**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Fluxos de energia aplicada à produção de biomassa

Antônio Morelli Arruda Junior

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Máquinas
Agrícolas

**Piracicaba
2013**

Antônio Morelli Arruda Junior
Bacharel em Ciências Biológicas

Fluxos de energia aplicada à produção de biomassa

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **THIAGO LIBÓRIO ROMANELLI**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Máquinas
Agrícolas

Piracicaba
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP

Arruda Junior, Antônio Morelli

Fluxos de energia aplicada à produção de biomassa / Antônio Morelli Arruda Junior. -
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.
132 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Cana-de-açúcar 2. Degradação energética 3. Energia de biomassa 4. Eucalipto
5. Florestas 6. Processamento de imagens 7. Sensoriamento remoto I. Título

CDD 333.7938
A779f

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte - O autor"

Dedicado a todos aos que acreditam
no valor das próprias conquistas.

Tudo em nós está em nosso conceito do mundo;
modificar o nosso conceito do mundo é modificar
o mundo para nós, isto é,
é modificar o mundo,
pois ele nunca será, para nós,
senão o que é para nós.

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter me dado o dom da vida e as graças tem me concedido.

Ao meu orientador Prof. Dr. Thiago Romanelli pela constante dedicação, apoio e confiança desde o início deste trabalho.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, através do Programa de Pós-graduação, pela oportunidade de me tornar um ser humano melhor.

Ao Prof. Dr. José Paulo Molin, por sua colaboração, análises construtivas e sinceras. Aos membros da banca de qualificação, avaliadores deste trabalho, pelas valiosas contribuições a este estudo.

Às funcionárias da seção da seção de pós-graduação em especial à Davilmar Collevatti pela presteza sempre procurando ajudar a todos.

Aos colegas da pós-graduação pela convivência e amizade durante o curso.

À minha amada esposa Walkiria, e aos meus filhos pelo amor, carinho, paciência e ajuda nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, pelo apoio e exemplo de perseverança.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho pudesse ser concluído.

SUMÁRIO

RESUMO	13
ABSTRACT	15
1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Biomassa	23
2.1.1 Energia de biomassa	23
2.1.2 Cana-de-açúcar como fonte energética	30
2.1.3 Eucalipto como fonte energética	31
2.2 Balanço energético radiativo	33
2.2.1 Sensoriamento remoto	35
2.2.2 Algoritmo SEBAL	37
2.2.3 Indicadores de degradação energética	40
2.3 Fluxos de energia na intensificação da produção	44
3 MATERIAL E MÉTODOS	48
3.1 Áreas avaliadas	48
3.1.1 Caracterização da área de cana-de-açúcar	49
3.1.2 Caracterização da área de eucalipto	50
3.1.3 Caracterização da área de floresta natural	50
3.1.4 Escolha das imagens	52
3.1.5 Dados das imagens Landsat utilizadas nas análises	52
3.2 Balanço energético radiativo	54
3.2.1 Aplicação do algoritmo SEBAL	54
3.2.2 Processamento das imagens Landsat	55
3.2.3 Reflectância	56
3.2.4 Albedo planetário	56
3.2.5 Albedo de superfície	57
3.2.6 Temperatura da superfície	57
3.2.6.1 Validação dos valores de temperatura de superfícies	58

3.2.7 Radiação de onda longa emitida _____	58
3.2.8 Radiação de onda curta incidente _____	59
3.2.9 Radiação de onda longa incidente _____	59
3.2.10 Saldo de radiação _____	59
3.2.11 Índice de eficiência em degradação energética _____	60
3.2.12 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) _____	60
3.3 Análise do balanço energético operacional _____	61
3.3.1 Análise de fluxo energético cana-de-açúcar _____	61
3.3.2 Fase plantio – principais operações mecanizadas _____	61
3.3.2.1 Capacidade de campo operacional _____	62
3.3.2.2 Mão-de-obra _____	62
3.3.2.3 Insumos _____	63
3.3.2.4 Cálculo de energia incidente _____	64
3.3.3 Operação de colheita _____	64
3.3.3.1 Operações Mecanizadas _____	64
3.3.3.2 Operações Manuais _____	65
3.3.3.3 Insumos _____	65
3.3.4 Cálculo de Balanço Energético _____	66
3.3.4.1 Cálculo Produção Agrícola Energética _____	67
3.3.4.2 Produção Agrícola _____	67
3.3.5 Análise de fluxo energético do eucalipto _____	68
3.3.5.1 Determinação de energia de entrada _____	69
3.3.5.2 Determinação de energia de saída _____	70
3.3.6 Análise do fluxo energético da floresta _____	70
3.3.7 Análise do balanço de energia do ganho líquido de energia _____	71
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO _____	72
4.1 Análise do balanço energético antrópico _____	72
4.1.1 Balanço energético da cana-de-açúcar _____	72
4.1.1.1 Entradas de energia para o ciclo produtivo _____	74
4.1.1.2 Produção energética (energia de saída) _____	74
4.1.1.3 Indicadores de energia _____	75
4.1.2 Balanço energético do eucalipto _____	76
4.1.3 Análise energética florestal pelo potencial calorífico da floresta _____	76

4.1.4 Análise da energia disponibilizada/demanda dos sistemas. _____	76
4.2 Análise por balanço energético radiométrico _____	77
4.3 Incidência de energia antrópica e a alteração da degradação energética _____	79
4.3.1 Análise do cultivo de cana-de-açúcar _____	79
4.3.2 Análise do cultivo de eucalipto _____	91
4.3.3 Análise do cultivo da floresta _____	97
4.4 Comparação entre as culturas. _____	102
5 CONCLUSÃO _____	107
REFERÊNCIAS _____	109
ANEXOS _____	121

RESUMO

Fluxos de energia aplicada à produção de biomassa

A crescente demanda por alimento e o aumento do uso de energias renováveis exigem cada vez mais o aumento da produtividade agrícola. Neste cenário, ferramentas e metodologias que possam monitorar as dinâmicas de sistemas agrícolas, são cada vez mais necessárias. Esse trabalho propõe a investigação da interferência de fluxos de energia de origem antrópica na produtividade por meio da biomassa obtida. Tendo como referência os estudos de Schneider e Kay (1992) sobre eficiência e transferência energética entre níveis tróficos e seus efeitos nos ecossistemas, os estudos foram concentrados em três áreas de diferentes características quanto às ações antrópicas: cana-de-açúcar, eucalipto e floresta natural. Utilizando cálculos de balanço energético por fluxo de massa e o balanço radiométrico, buscou-se verificar se a entrada de energia via atividades agrícolas, afetou a capacidade de degradação energética do cultivo e sua conversão em biomassa. Os estudos radiométricos foram realizados a partir dos valores de onda longa emitida e onda curta incidente, extraídos das imagens de satélite Landsat 5 por meio do algoritmo de SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), que ainda forneceu os dados de saldo de radiação para complemento dos estudos. Os resultados obtidos indicaram que a entrada de energia antrópica nos sistemas não alterou os valores referentes à degradação energética, independentemente da cultura analisada.

Palavras chave: Eucalipto; Cana-de-açúcar; Bioenergia, Degradação energética

ABSTRACT

Energy flows applied to biomass production

The growing demand for food and increased use of renewable energies increasingly require increasing agricultural productivity. In this scenario, tools and methodologies that can monitor the dynamics of agricultural systems, are increasingly necessary. This study proposes to investigate the interference of energy flows of anthropic origin in productivity through biomass obtained. With reference to the studies of Schneider and Kay (1992) on efficiency and energy transfer through trophic levels and their effects on ecosystems, those studies were concentrated in three areas with different characteristics regarding human actions: sugarcane, eucalyptus and natural forest. Were used calculations to energy balance by mass flow and radiometric balance, intending to determine whether the energy input via agricultural activities affected the capacity of degradation of energy crops and their conversion into biomass. The radiometric studies were performed using the values emitted longwave and shortwave incident, taken from Landsat 5 satellite images, through algorithm SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), which also provided additional net radiation values for the studies. The results indicates that input of anthropic energy in the systems, did not alter the values for the degradation of energy, regardless of the analyzed culture.

Keywords: Eucalyptus; Sugarcane; Bioenergy; Energy degradation

1 INTRODUÇÃO

O modelo de desenvolvimento energético no panorama mundial adotado como estratégia pelos países economicamente desenvolvidos é alicerçado no uso dos combustíveis fósseis, mas a adoção de políticas que visam a segurança ambiental e a sustentabilidade vem trazendo uma gradativa mudança a essa configuração em relação ao uso de energias renováveis.

A obtenção de energia busca, aos poucos, substituir o petróleo e seus derivados por fontes como a geração eólica, solar e de biomassa, em conformidade com iniciativas políticas locais. O modelo de desenvolvimento econômico baseado no consumo e produtividade requer um eficaz setor energético. Assim, a disponibilidade de energia, além de estratégica, está diretamente relacionada ao potencial econômico de cada país.

Historicamente, nenhuma transição de modelo energético foi motivada pelo esgotamento físico de uma fonte de energia e sim, por ter acesso a outra, com qualidades superiores e custos menores (SACHS, 2007). O desafio do desenvolvimento sustentável do setor energético está então, em produzir mais, fornecendo energia de maneira mais eficiente e preferencialmente proveniente de fontes renováveis.

Desde os anos 1980, após as crises econômico-políticas geradas pela dependência do petróleo, a busca por alternativas à questão dos combustíveis aliou-se às preocupações quanto às questões ambientais. Tais enfoques vêm ganhando maior destaque no sentido de encontrar um ponto de equilíbrio entre a obtenção de recursos que atendam as necessidades de produção e a minimização de danos causados ao ambiente. Nesse panorama, o uso da biomassa como componente da matriz energética está relacionada ao seu apelo como recurso energético renovável e sustentável, além da possível viabilidade econômica em países com disponibilidade territorial e agrícola, como o Brasil.

Os países que não possuem recursos hídricos ou outras fontes energéticas renováveis como as existentes no Brasil, em geral obtêm a energia para o desenvolvimento de suas atividades econômicas principalmente por meio da queima de combustíveis fósseis e carvão, a exemplo da China e Estados Unidos. Essas fontes provocam o aumento de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, entre outros

problemas ambientais considerando sua cadeia produtiva, armazenagem e distribuição (MENEGUELLO; CASTRO, 2007).

Neste contexto, o interesse por fontes alternativas de energia a partir de biomassa vegetal visa mitigar os impactos ambientais negativos. Considerando a disponibilidade de opções para produção em grandes escalas, aumenta a busca de fontes como a biomassa gerada por cana-de-açúcar e milho.

A biomassa é uma fonte de energia derivada das culturas agrícolas e florestais, além dos resíduos da indústria da madeira, dos efluentes domésticos, de instalações agropecuárias, de indústrias agro-alimentares e dos resíduos sólidos urbanos. Esses sistemas apresentam como vantagens fundamentais terem baixa emissão de gases de efeito nocivo aos humanos e de contribuírem para o desenvolvimento local.

O Brasil, dadas as condições favoráveis, já conta com 45% da sua matriz energética composta por fontes renováveis, incluindo a biomassa. Contribuem na composição deste cenário, a sua vasta extensão territorial, condições bioclimáticas favoráveis e a experiência adquirida quanto ao trato e exploração florestal, além da existência de grande quantidade de material disponível pela expansão da fronteira agrícola e do excedente de bagaço de cana-de-açúcar na indústria sucroenergética. O aprimoramento das tecnologias de transformação também possibilita melhores produtividades a cada ano (SILVA et al., 2004).

A necessidade pela busca de novas fontes energéticas, além da crescente demanda por alimentos, exerce sobre a agricultura uma enorme pressão pelo aumento da produtividade sem prejuízos sociais e com a preocupação de preservar o meio ambiente. Assim, a utilização de insumos para aumentar a produtividade agrícola é um dos recursos utilizados para compensar eventuais perdas na produtividade causadas por problemas no solo, ou aparecimento de pragas (VEIGA, 2007).

Conhecida como “revolução verde”, o modelo de agricultura intensiva tinha como base o uso intensivo de fertilizantes químicos, defensivos e da mecanização em todas as etapas do processo produtivo. O uso racional desses recursos é essencial para garantir um rendimento econômico para o produtor rural, mas devem também, ajudar a diminuir os impactos ambientais e sociais, causados pela contaminação, embora conforme propagado por movimentos e campanhas

(governamentais ou não), devam ser progressivamente abandonado o uso de produtos nocivos ao ambiente e à saúde humana (ASSAD; BURSZTYN, 2000).

Essas novas práticas agrícolas têm sido chamadas de “revolução duplamente verde” (terminologia criada pelo cientista indiano M. S. Swaminathan), que defende as soluções intensivas em conhecimento, em trabalho e o uso racional dos recursos naturais do capital. Essa teoria propõe ainda a integração dos sistemas de produção e o acesso da energia a todos os produtores (SACHS, 2007). Este conceito prega que além dos custos benefícios tradicionais, outros critérios deverão ser considerados na avaliação do processo agrícola, como produtividade por hectare, na geração de oportunidades de trabalho decente na produção de biomassa, nas condições de transporte, processamento e aproveitamento dos subprodutos e na eficiência energética do sistema (balanço energético).

A necessidade de informações confiáveis sobre a produção das culturas, principalmente as de maior importância econômica no mercado nacional e internacional, é essencial e torna-se cada vez mais compatível às dinâmicas agrícolas. A utilização das ferramentas de sensoriamento remoto é uma alternativa que viabiliza o fornecimento dessas informações, principalmente para grandes extensões cultivadas. Mesmo apresentando dificuldades operacionais como os custos das imagens, o processamento dos dados, tempo de revisita do satélite, disponibilidade e nível de detalhes da imagem, incidências de nuvens sobre a área do projeto, este é um meio rápido e eficiente de detecção comportamental das culturas.

Ao longo das últimas décadas (desde 1970), as metodologias empregadas em estudos ambientais sofreram grande impacto com novas tecnologias, maior agilidade, objetividade, consistência e precisão na tomada de decisões geoespaciais. O processamento de informações geográficas nos dias de hoje é uma atividade fundamental nas análises qualitativas e quantitativas na caracterização do objeto de estudo (FLORENZANO, 2008).

A partir de análises remotas de imagens de satélites de áreas de cultivo, é possível a geração de mapas digitais, elementos básicos de um sistema de informação geográfica (SIG). Como modo de comunicação, a função do mapa é a de proporcionar acesso a um banco de dados de referência acumulada não cartográfica, que conecta informações descritivas e estáticas associadas a objetos. Dados não-cartográficos podem ser visualizados em tabelas, gráficos e imagens

(incluindo imagens digitais de satélite), derivando de diversas fontes e informações, como algumas características físicas (umidade, reflectância, absorvência e transmitância de energia) das superfícies estudadas.

As possibilidades de quantificação de atributos por meio da espectroscopia (análise do solo usando energia refletida) ganharam maior credibilidade com o desenvolvimento dos algoritmos remotos e da propagação das técnicas de sensoriamento ao longo das últimas décadas. A disponibilidade de imagens gratuitas e acessíveis (como as do satélite Landsat - Land Remote Sensing Satellite) torna possível a realização de estudos que requeiram comparativos de vários períodos, por exemplo, ou sobre áreas extensas e/ou distintas entre si. Embora haja necessidade de alguns ajustes para as análises, os resultados apresentados têm sido satisfatórios e compatíveis tanto em termos qualitativos quanto em termos de prazos.

A melhoria de informações sobre os parâmetros da produtividade, a análise do balanço energético podem ser importantes instrumentos para a definição de novas técnicas e manejos agropecuários. Com o objetivo de estabelecer os fluxos de energia, identificando sua demanda total e eficiência, obtida pelo ganho líquido de energia e pela relação saída/entrada, além da quantidade necessária para produzir ou processar um quilograma de determinado produto. Nesse processo, quantificam-se todos os insumos utilizados e produzidos que são transformados em unidades de energia (FERNANDES et al., 2008).

A proposta de apresentar uma alternativa que possa conciliar a velocidade de aquisição de dados, com informações complementares sobre o comportamento da produtividade, vem de encontro às necessidades da agricultura. Nesse sentido as ferramentas de balanço energético radiométrico por imagens de satélite, podem apresentar uma boa resposta, uma vez que utilizam dados climatológicos, de relevo e da cobertura vegetal.

Em seu trabalho, os pesquisadores Schneider e Kay (1992) relacionaram análises de balanço energético com a produtividade de biomassa. A essência da pesquisa se baseia nos conceitos termodinâmicos de degradação e de transferência de energia entre os níveis tróficos de um ecossistema. Segundo eles, quanto maior a degradação da energia radiométrica, maior será a sua conversão em prol do ambiente e como resultado final, surgem ecossistemas mais estáveis e mais preparados para as possíveis perturbações externas. Utilizando ferramentas de

sensoriamento remoto (imagens de avião), estudaram diferentes grupos de vegetações e puderam validar essa teoria. Uma característica do método utilizado no trabalho foi considerar a energia solar como o único fluxo de energia incidente dentro dos sistemas, não considerando o fluxo energético via decomposição de nutrientes e o fluxo energético antrópico (adubos, mão de obra para trabalhos na terra, emprego de maquinário agrícola) como fluxos de energia incidentes.

Assim, acredita-se ser possível determinar, em função da degradação energética (função primária de qualquer sistema vivo), dados sobre a eficiência destes sistemas, sua formação e desenvolvimento. Quando um fenômeno altera esta eficiência, os sistemas tendem a entrar em desequilíbrio e as consequências diretas são a perda de biomassa, o aumento da respiração e a queda na eficiência para degradar energia.

Considerando-se a crescente demanda energética e busca por medidas produtivas voltadas à sustentabilidade e conservação ecológica, as fontes de energia renovável são estudadas sob várias vertentes a fim de se estabelecer o seu uso de forma otimizada. As ferramentas para mensurar e comparar as fontes geradoras de biomassa podem ser utilizadas na avaliação de viabilidade de culturas para determinadas regiões, respeitando a dinâmica própria a cada biosistema.

A proposta desse trabalho é aplicar esse conceito dentro de um ambiente agrícola e investigar o quanto a entrada de outros fluxos de energia pode alterar essa degradação e consequente seu comportamento na conversão de biomassa.

Para tanto serão investigadas 3 áreas distintas: uma área de cana-de-açúcar, onde se espera uma intervenção antrópica mais intensa. Uma área de eucalipto, que pelas características do plantio deverá receber uma intervenção antrópica diferente da primeira área e uma área de floresta nativa em estágio avançado de regeneração, onde a intervenção antrópica é menor em relação às demais áreas de estudo.

Para analisar quanto se relacionam os parâmetros de degradação de energia solar e produtividade, as diferentes fontes de biomassa (cana-de-açúcar, eucalipto e floresta natural) serão comparadas por meio de ferramentas de sensoriamento remoto. Essa análise visa verificar o quanto as interferências antrópicas sofridas pelos sistemas de produção interferem na degradação da energia solar incidente e conseqüentemente, na produção de biomassa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biomassa

A biomassa é vista como uma fonte de energia interessante por várias razões. A principal é que a bioenergia pode contribuir para o desenvolvimento sustentável, proporcionando segurança energética. Os recursos são muitas vezes disponíveis localmente e a conversão de vetores de energia alternativos é possível sem investimentos elevados. Além disso, a energia de biomassa pode ter um efeito positivo sobre a terra degradada pela adição de matéria orgânica ao solo (HOOGWIJK et al., 2002).

O uso de biomassa como recurso energético em larga escala e suas conseqüências quanto às questões de viabilidade técnica, econômica, social e ambiental ainda requer investimentos e interesse político, embora se faça cada vez mais necessário.

2.1.1 Energia de biomassa

A evolução do consumo energético no panorama mundial foi embasada nas tendências dos países desenvolvidos, o que resultou na insuficiência de fornecimento energético para os países em desenvolvimento, que se tornaram dependentes da importação de matéria prima (combustíveis fósseis). Diante disso, a matriz energética mundial baseada em recursos energéticos não-renováveis, vem sofrendo mudanças. Com as crises do petróleo em 1973/74 e em 1979/80, cresceu o interesse de várias nações por intensificar o aproveitamento do potencial de outras fontes de energia, dentre elas o carvão mineral, o gás natural e a madeira como suprimento de energia primária, principalmente no uso doméstico e industrial (BRITO; CINTRA, 2004).

Sachs (2007) chama a atenção ao fato que historicamente, nenhuma transição de modelo energético foi motivada pelo esgotamento físico de uma fonte de energia e sim pela substituição por uma fonte com qualidades superiores e custos menores.

O interesse em fontes alternativas de energia, a partir de biomassa vegetal, para substituir as reservas cada vez menores de combustíveis fósseis e derivados de petróleo, tem sido influenciado pelo aumento constante dos preços mundiais do petróleo bruto. Isto foi evidenciado no início de 2011, quando as incertezas da situação política de alguns países do Oriente Médio e Norte da África levaram o preço do petróleo bruto para mais de 120 US\$ barril⁻¹ na Bolsa de Londres. Além disso, a queima de combustíveis petroquímicos tem influenciado a mudança climática e o aquecimento global agravado, principalmente devido a emissão de gases de efeito estufa (GEE). As tentativas de mitigar os impactos ambientais levaram à busca de fontes renováveis e limpas de energia. Essas fontes incluem o etanol de cana e etanol de amido de milho, que representam alternativas para superar os problemas econômicos e impactos ambientais (GONÇALVES et al., 2011).

A opção de mudar a matriz energética de combustíveis fósseis para fontes de energia renováveis, como eólica, solar ou biomassa, é motivada por iniciativas políticas nacionais ou regionais. Por exemplo, a União Europeia emitiu uma diretiva que fixa um objetivo comunitário de fornecer 20% do consumo total de energia proveniente de fontes renováveis até 2020. O objetivo é então compartilhado pelos Estados-Membros: o Reino Unido, por exemplo, concordou em aumentar o componente de energia renovável a partir de 1,3% em 2005 para 15% até 2020.

Os ambientes urbanos são reconhecidos como tendo um papel importante na concretização das metas de uso de energias renováveis. Ao considerar o planejamento, concepção, construção e renovação de zonas industriais ou residenciais, alguns exemplos desta política ambiental exigem a utilização de níveis mínimos de energia proveniente de fontes renováveis em edifícios novos ou reformados. No Reino Unido, há o código para residências sustentáveis, um método de avaliação ambiental para certificação de desempenho de casas novas. Este código reconhece sistemas energéticos baseados em biomassa (caldeiras domésticas simples para aquecimento urbano e energia combinados) como "tecnologias de baixo ou zero carbono" (KEIRSTEAD et al., 2012).

Abordadas estas questões em uma escala geográfica agregada (global), as cidades respondem por cerca de dois terços do consumo mundial de energia primária e 71% de combustíveis fósseis relacionados à emissões de gases de efeito estufa diretos. Portanto, para garantir que as cidades mantenham suas funções

vitais, sociais e econômicas e ainda possam mitigar a mudança climática global, há necessidade de se desenvolver sistemas de energia urbanos que sejam mais eficientes e emitam menos dióxido de carbono (KEIRSTEAD et al., 2012).

Da energia total de biomassa consumida em 1998 no mundo, estimadamente 45.710 EJ ano⁻¹, cerca de 7 EJ ano⁻¹ foram consideradas oriundas de biomassa moderna. Estima-se que a energia de biomassa moderna deva ganhar participação no mercado de energia futuro, na ordem de 10% a cerca de 50% do total da demanda de energia primária, pois além dos custos de produção e de conversão de biomassa terem tendência à redução, os recursos estão amplamente disponíveis e existe um aumento esperado na demanda por combustíveis “CO₂ neutro”.

A energia de biomassa pode desempenhar um papel importante na redução das emissões de gases de efeito estufa, já que quando produzidos e utilizados de forma sustentável, compensa as emissões de gases nocivos ao ambiente (GUARDABASSI, 2006).

As plantações voltadas à produção de energia também podem criar novas oportunidades de emprego nas áreas rurais dos países em desenvolvimento, contribuindo para o aspecto social da sustentabilidade (HOOGWIJK et al., 2002). O principal uso da energia de biomassa nestes países é como lenha para cozinhar e aquecer. Parte desta tradicional utilização da biomassa é considerada não sustentável, pois contribui para a degradação da terra, por vezes mesmo a desertificação. Produzir energia de maneira mais sustentável é vital para diminuir e evitar impactos negativos sobre o meio ambiente, gerando menor dano ao clima, solo, água e na biodiversidade (HENNENBERG et al., 2009).

O uso moderno da biomassa é distinguido do uso tradicional de energia de biomassa por sua conversão em transmissores de alta qualidade de energia, como eletricidade e combustíveis líquidos de biomassa para o transporte. Exemplos da utilização de biomassa moderna são: a produção de etanol no Brasil a partir da cana-de-açúcar, calor e energia combinados (CHP) no aquecimento urbano de programas em países como a Áustria e Escandinávia e a co-combustão de biomassa e carvão convencional em usinas na Holanda (HOOGWIJK et al., 2002).

Até que ponto a biomassa vai ganhar futuros mercados de energia, depende de vários aspectos, por exemplo, da disponibilidade de recursos, dos custos da biomassa primária, do desenvolvimento de tecnologias de conversão, do custo de energia de biomassa convertida e implementação social e/ou fatores institucionais,

como as restrições de instalação, requisitos para licenciamentos e taxas de financiamento (HOOGWIJK et al., 2005). Porém, deve-se ressaltar que o uso da biomassa como componente da matriz energética está muito mais ligada ao seu apelo como recurso energético renovável e sustentável, do que necessariamente a sua viabilidade econômica frente aos derivados do petróleo ou a proposta de uma fonte energética nuclear (SARTORI; FLORENTINO, 2005).

O ser humano fez uso da biomassa vegetal durante toda a sua história. A utilização de matéria vegetal ajudou na sobrevivência e conforto da espécie, fosse como abrigo, alimento, proteção ou matéria para alimentar o fogo. Com o advento da agricultura, o homem passou a se fixar, criar sociedades, planejar seu crescimento e a se alimentar melhor. Essa relação vem ganhando nova importância nos últimos anos com os estudos para a conservação e restauração dos ambientes naturais e a necessidade crescente de geração de energia (ROMANELLI, 2007).

É notório que as culturas agrícolas geram um recurso (biomassa) que pode ser explorado como energia elétrica, térmica ou processado para uso de combustíveis, sendo possível o aproveitamento de produtos ou sub-produtos de origem florestal, resíduos da indústria madeireira ou mesmo resíduos de culturas agrícolas (SZCZODRAK; FIEDUREK, 1995). A energia produzida por biomassa vegetal constitui uma promissora opção às fontes energéticas disponíveis, podendo ser transformado em combustível sólido, líquido, gasoso ou convertido em energia térmica e elétrica (COUTO et al., 2004). Como biocombustível, produz um número menor de microcombustíveis que as demais formas, além de ajudar na fixação de carbono na atmosfera (SARTORI; FLORENTINO, 2005).

A biomassa pode provir também de sistemas dedicados, nomeadamente culturas lenhosas de curta rotação, em grande expansão em inúmeros países da Europa Américas do Norte e do Sul. Esses sistemas apresentam como vantagens fundamentais um balanço insignificante em termos de CO₂ e de contribuírem para o desenvolvimento local e pela criação de riqueza. Do ponto de vista agrônomo, é de todo o interesse avaliar a competitividade de culturas não lenhosas, não utilizadas na alimentação humana, para a produção de biomassa e/ou biocombustíveis (ALMENIDA, 2009; AGUILAR et al., 2011).

Apesar dos benefícios, o uso da biomassa como componente energético ainda recebe críticas por questões sociais, ambientais e políticas. Os aspectos sustentáveis dos sistemas energéticos não são limitados pelo tripé econômico-

ambiental-social, pois incluem ainda aspectos estratégicos e políticos (ROMANELLI, 2007). As questões mais controversas dizem respeito ao manejo agrícola, pois há o temor de que o componente econômico prejudique o uso de terras para a produção de alimentos, assim como as áreas de preservação natural.

O perfil do setor energético mudou substancialmente nos últimos 40 anos. Os períodos de forte expansão das indústrias de energia intensiva, atraídos pela energia relativamente barata e abundante, foram intercalados com períodos de estagnação e retração econômica. Nos últimos 5 anos, o consumo de energia industrial tem sido relativamente estável, mesmo com a recente crise internacional. Em 2011, o consumo total de energia atingiu 272,3 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) (BRASIL, 2012), cujo perfil é bastante diferente em comparação a outros países. Embora indústrias de energia intensiva sejam responsáveis por cerca de 36% do consumo total de energia no Brasil, na maioria dos países não excede 26% (HENRIQUE et al., 2010).

Dados estatísticos indicam que a madeira destinada para a geração de energia soma mais da metade da biomassa florestal consumida mundialmente, em especial nos países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil. A lenha e o carvão vegetal, os combustíveis provenientes da madeira mais amplamente usados como fonte energética predominante, vitais à nutrição das famílias rurais e das comunidades em diversas regiões do planeta. De cada seis pessoas, duas utilizam a madeira como a principal fonte de energia, particularmente para famílias de países em desenvolvimento. Ela sustenta determinados processos, como secagens, cozimentos, fermentações e produções de eletricidade (FAO, 2003).

No contexto de geração de energia sustentável ambientalmente, a energia de biomassa pode desempenhar um papel importante na redução das emissões de gases de efeito estufa, já que quando produzidos e utilizados de forma sustentável, compensa as emissões de gases nocivos ao ambiente. As plantações voltadas à produção de energia também podem contribuir para o aspecto social da sustentabilidade criando oportunidades de emprego nas áreas rurais de países em desenvolvimento (HOOGWIJK et al., 2002).

Apesar do volume menos significativo, nos países desenvolvidos a madeira também é usada como fonte de energia e considerando o aspecto ambiental, seu uso vem se tornando mais importante, por ser um potencial substituto para os combustíveis fósseis como fonte de energia ambientalmente mais saudável,

relacionando o seu uso à diminuição das emissões dos gases do efeito estufa. (BRITO; CINTRA, 2004).

O modelo econômico que privilegia a adoção de fontes energéticas primárias (principalmente os derivados de fontes fósseis) é responsável pela emissão de dois terços de toda emissão de CO₂ mundial. Cada vez mais os países tentam aumentar sua oferta energética, procurando desenvolvimento econômico e social mais alinhados às questões ambientais, ainda que prevaleça o interesse lucrativo (SEABRA et al., 2010). A busca por encontrar um ponto de equilíbrio, sem radicalismo, se faz necessário, de modo que a sociedade possa ter recursos que atendam suas necessidades, minimizando danos ao meio ambiente (GUARDABASSI, 2006).

Além dos custos financeiros da exploração de uma fonte energética, os custos ambientais têm papel de destaque na composição na matriz energética de um país. Goldemberg e Lucon (2008) apontam que alguns dos problemas ambientais como poluição do ar, chuva ácida, aquecimento global, perda da biodiversidade, estão relacionados diretamente com a geração e o consumo segundo o modelo energético atual.

Nos EUA, a madeira tem sido historicamente uma importante fonte de energia, responsável, por exemplo, por noventa e um por cento do consumo interno estimado em 1850 e continua a ser uma importante fonte de energia para milhões de pessoas em todo o mundo. No entanto, quando os combustíveis fósseis tornaram-se mais acessíveis e disponíveis, a madeira utilizada como fonte energética foi reduzida a uma pequena fração do consumo total anual de energia dos EUA. Em 1973, a madeira representava cerca de dois por cento da energia consumida nos EUA, mas ainda representa um componente importante do setor no país de energia renovável (AGUILAR et al., 2011).

Já os estudos utilizados no processo de cálculo potencial de energia, nem sempre fazem uma introspecção aprofundada em fatores importantes como a relação entre o uso da terra e o potencial de geração de biomassa enquanto matriz energética como calculado por Hoogwijk et al. (2002). Abordadas em escala global, tornam possível concluir que o potencial energético de disponibilidade de biomassa primária é influenciado:

1. Pela procura de alimentos como uma função da população e a dieta consumida;

2. Pelo sistema de produção de alimentos que podem ser adotadas em todo o mundo, tidas em conta a água e disponibilidade de nutrientes;
3. Pela produtividade das florestas e culturas energéticas;
4. Pelo aumento da utilização de bio-materiais;
5. E por outras opções concorrentes para o uso da terra como por exemplo, a regeneração natural (HOOGWIJK et al., 2005).

A produção de energia é uma atividade que normalmente degrada o ambiente. Os países que não possuem recursos hídricos, e outras fontes renováveis de energia como as existentes no Brasil, geralmente obtêm a energia para o conforto das populações e para o desenvolvimento de suas atividades econômicas por meio da queima de combustíveis fósseis, que provocam o aumento de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. (MENEGUELLO; CASTRO, 2007).

O uso da biomassa como componente da matriz energética está muito mais ligada ao seu apelo como recurso energético renovável e sustentável, do que necessariamente a sua viabilidade econômica frente aos derivados do petróleo ou a proposta de uma fonte energética nuclear (SARTORI; FLORENTINO, 2005).

Porém, antes da adoção de uma cultura agrícola como matéria prima para geração de energia deve-se investigar o real valor calorífico desta “fonte energética”, avaliando o máximo possível de informações sobre gestão desta produção agrícola, formas de armazenamento, estocagem e localização geográfica das áreas de plantio (BRAND, 2007).

As culturas agrícolas englobam o grupo da matriz energética, como co-geração, a qual no Brasil ainda está muito aquém do seu potencial. Os setores que mais freqüentemente estão adotando a co-geração são indústrias que possuem subprodutos do processo produtivo que podem ser utilizados como combustível. Dentre os setores que empregam a co-geração, o sucroenergético é aquele que apresenta maior capacidade instalada e a maior produção de energia.

Sendo uma indústria energeticamente intensiva, o elevado custo associado à comercialização da energia elétrica – seja na venda de excedentes, seja na aquisição para consumo próprio – constituem a explicação mais plausível para a autossuficiência na produção de energia elétrica pelo setor sucroalcooleiro, aliada à pequena geração de excedentes de energia para comercialização (SOUZA, 2002).

Quanto aos impactos ambientais, são consideráveis os eventuais conflitos que toda a cadeia de produção energética pode envolver, de sua geração à

distribuição e armazenamento. Portanto, quanto à questão energética no desenvolvimento sustentável, o desafio está em produzir mais e melhor com menor quantidade de energia proveniente de fontes renováveis, de maneira mais eficiente (MENKES, 2004).

2.1.2 Cana-de-açúcar como fonte energética

A biomassa vegetal tem sido usada de forma crescente no mundo como insumo energético, principalmente como energia térmica, mas já de forma importante como geradora de energia elétrica e como origem de combustíveis líquidos (etanol).

Souza (2002) ressalta que para o setor produtivo de cana-de-açúcar o elevado custo da energia elétrica, associado à comercialização dos excedentes de produção (da conversão de biomassa em energia elétrica), constitui a explicação de como algumas empresas do setor tornaram-se autossuficientes na produção de energia elétrica.

Um ponto favorável à geração elétrica por meio de cana-de-açúcar é que ela pode ocorrer majoritariamente, ou exclusivamente, durante os meses de estiagem, principalmente na região Centro-Sul, caracterizando-se assim em uma geração complementar à geração hidrelétrica. Outra vantagem está em que, pensando exclusivamente nas tecnologias de co-geração com turbinas a vapor, a indústria nacional está qualificada a fornecer a totalidade dos equipamentos necessários, o que resulta substancial redução dos investimentos em relação às alternativas em que se requer a importação de equipamentos. Dada a qualificação da indústria nacional e ao fato de que os investimentos correspondentes podem ser feitos em moeda nacional, o custo da potência instalada é bastante competitivo, (500-600 US\$ kW⁻¹ para biomassa) comparando-se a outras alternativas de expansão da capacidade de geração (COSTA, 2006). A geração de energia da cana-de-açúcar como insumo permite que a queima de resíduos agrícolas (com produção sazonal), possibilitando o uso simultâneo de combustíveis complementares para permitir a geração durante todo o ano. Esta estratégia permite o aumento de produção, sem aumentar os custos de logística e estocagem da biomassa. Nas usinas no centro-sul

do Brasil, é possível ainda que o gás natural seja um combustível complementar adequado (MACEDO, 2001).

Com o advento do etanol celulósico, a segunda geração do etanol, qualquer biomassa – palhas, folhas, resíduos florestais, madeira – passará a servir de matéria-prima. Os Estados Unidos estão apostando pesadamente nessa alternativa, propondo uma gama cada vez maior de produtos da “química verde” (SACHS, 2007). Nesse contexto, o Brasil poderá perder rapidamente a vantagem competitiva do etanol de cana-de-açúcar ante o avanço do etanol celulósico, que disporá de uma base de matéria-prima extremamente abundante e barata (GAZZONI, 2005; SACHS, 2007). Segundo Sachs (2007), além do tradicional custo/benefício deverão ser usados critérios ambientais e sociais, a eficiência energética (*energy in/energy out*), o seqüestro de carbono, a produtividade, a demanda por água, a geração de oportunidades de trabalho na produção, processamento, serviços de acompanhamento, transporte e aproveitamento dos subprodutos na avaliação entre as fontes energéticas.

2.1.3 Eucalipto como fonte energética

As florestas de eucalipto podem vir a ser uma opção interessante para a produção de bioenergia pela agropecuária brasileira. A existência de uma considerável extensão de terras com aptidão florestal localizada em várias regiões, aliada a uma rentabilidade atraente por unidade de área, são elementos importantes no fomento da atividade. O desenvolvimento de tecnologias que aproveitem mais intensivamente o potencial energético da floresta poderá gerar novos pólos de desenvolvimento baseados na utilização de madeira como matéria-prima. Porém deve-se ressaltar que a produtividade é dependente das condições de solo, condições edafoclimáticas e manejo do cultivo, além da escolha da melhor espécie para o local (SANTANA et al., 1999).

A estruturação de uma proposta para este aproveitamento bioenergético deve, portanto, englobar atividades como zoneamento, regionalização, suporte político institucional, desenvolvimento científico e tecnológico sustentadas por ações como assistência técnica, fomento, produção de sementes e mudas, alternativas produtivas, substituição de fontes energéticas. Os programas devem ser

direcionados, prioritariamente para o atendimento da demanda e da produção energética numa perspectiva de uso múltiplo, conforme comparação na Figura 1 (CASTANHO FILHO, 2008).

Figura 1 – Produções e Custos de Cana e Eucalipto como Energéticos

Fonte: Castanho (2008)

Quanto ao desenvolvimento científico e tecnológico, há pesquisas nas seguintes áreas: pesquisa florestal como respaldo à silvicultura tradicional acrescida das questões envolvidas na regeneração de áreas degradadas, na condução de maciços florestais heterogêneos, no manejo de áreas naturais, na definição de alternativas econômicas de exploração de matas nativas, e ainda no planejamento silvicultural, na organização produtiva e na tecnologia de aproveitamento energético de madeira (CASTANHO FILHO, 2008).

Goldenberg et al. (2008) ressalta que a utilização de florestas como fonte de energia tem um bom potencial de crescimento, seja pelo desenvolvimento de novas tecnologias ou pelo baixo custo de produção. Além disso, as limitações ao consumo de combustíveis fósseis tendem a favorecer as florestas plantadas, fornecendo à biomassa uma nova relevância.

A utilização da biomassa florestal como fonte de energia é sem dúvida a alternativa que contempla a vocação natural do Brasil. E o eucalipto é a principal espécie para as florestas energéticas, por apresentar rápido crescimento, alta produtividade e facilidade de adaptação. (CORTEZ et al., 2009).

2.2 Balanço energético radiativo

A radiação solar é responsável pelos processos de aquecimento do ar, do solo, da transferência de vapor d'água da atmosfera para a superfície e do metabolismo das plantas. O estudo de fluxo de balanço de radiação é o processo algébrico dos balanços de ondas curtas e ondas longas entre a energia recebida e a energia perdida (SILVA, 2005).

O saldo de radiações é obtido por intermédio de radiômetros, os quais são raramente instalados em estações meteorológicas utilizadas para estudos regionais e com custo financeiro elevado. As técnicas de sensoriamento remoto compõe uma metodologia que pode ser aplicada em grande áreas com um baixo custo, para obter dados geofísicos da superfície terrestre (albedo, emissividade, fluxo de calor no solo, temperatura, fluxo de calor sensível), o que possibilita estimar o Balanço Energético (BE) e o Fluxo de Calor Latente (LE). Uma das aplicabilidades do estudo de Balanço Energético é a estimativa das perdas de água por superfícies vegetadas e base dos projetos de agricultura irrigada (GOMES et al., 2009).

Os métodos de estimativa dos fluxos de balanço de energia na superfície terrestre envolvem duas partes: uma parte é a identificação da energia líquida dos fluxos das radiações onda longa e onda longa recebida na superfície e outra parte é quantificar os fluxos de utilização da radiação líquida recebida na superfície (LIU, 2007).

O saldo de radiação pode ser capaz de caracterizar a natureza da superfície, a energia disponível em um sistema e por intermédio de cálculos de transpiração, estimar a produtividade de culturas agrícolas (NORMAN et al., 2003). Para a obtenção de desses parâmetros físicos, seria necessária a instalação de uma malha de estações de superfície coletando dados continuamente. Este modelo apresenta dificuldade de gerenciamento e manutenção de funcionamento, devido aos custos de manutenção em relação às imagens de satélites, que têm cobertura de praticamente todo o planeta (GIONGO et al., 2010).

Gallo et al. (1982) em seus estudos, concluíram que estimar a radiação solar utilizando dados espectrais (orbitais) é uma abordagem viável, sendo que a utilização destas informações acrescidas de dados físicos e climáticos, pode quantificar o rendimento de culturas agrícolas.

Atualmente os sensores remotos (SR) são ferramentas das mais atrativas, disponíveis aos investigadores e aos técnicos para conhecer a evolução temporal e espacial dos diferentes sistemas naturais. Com os dados gerados pelos SR é possível obter parâmetros geofísicos da superfície terrestre (albedo, emissividade, fluxo de calor no solo, temperatura de superfície, fluxo de calor sensível), de grande utilidade para a estimativa do Balanço de Energia (BE) em escala regional possibilitando assim estimar o Fluxo de Calor Latente (LE) que é a energia disponível para o processo da Taxa de Evapotranspiração (ET) (BOEGH et al., 2002; FRIEDL, 2002; SOBRINO et al., 2004; KUSTAS et al., 2003).

A metodologia de avaliação da distribuição espacial da ET a partir da equação do BE com SR e dados meteorológicos, se aplica aos dados captados pelo sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+, Landsat 7) (Instituto de Hidrología de Llanuras).

Bastiaanssen (2000) chama a atenção sobre a viabilidade da adoção um novo modelo de gestão territorial que utiliza informações de evapotranspiração (originária de dados orbitais), como componente efetivo na matriz de decisão do planejamento e ordenamento de recursos hídricos. A detecção remota e os sistemas de gerenciamento de ET podem ser utilizados no mapeamento de bacias hidrográficas, apresentando melhores dados quantitativos sobre a distribuição espacial temporal e variação de ET.

Rolim (et al., 2008) ressalta ainda que estudos sobre o balanço energético de áreas agrícolas permitem a compreensão dos processos de mudança de energia em relação à evapotranspiração e à fotossíntese, que afetam diretamente o acúmulo de biomassa e produção agrícola.

Os diferentes dados gerados a partir dos dados orbitais podem ser empregados para diferentes usos do solo, em diferentes períodos do cultivo, fornecendo aos gestores de água uma base para a avaliação de eficiência na utilização da água. Estes dados podem ajudar na formulação de atribuições de quotas de irrigação (água subterrânea, bombeamento) ou obras de infraestrutura.

2.2.1 Sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto é definido como uma técnica de aquisição e de aplicação das informações sobre um objeto, sem nenhum contato físico com ele. A informação é adquirida pela detecção e medição das mudanças que o objeto impõe ao campo ao seu redor. Este sinal pode incluir um campo eletromagnético emitido e/ou refletido, ondas acústicas refletidas e/ou perturbadas pelo objeto, as perturbações do campo de gravidade ou o potencial magnético com a presença do objeto. Geralmente a aquisição de informações é baseada na captação dos sinais eletromagnéticos que cobrem o espectro inteiro das ondas eletromagnéticas, desde a onda longa de rádio, microondas, infravermelho termal, médio e próximo, visível, ultravioleta, raios X, até os raios gama (LIU, 2007).

Basicamente o sensoriamento remoto consiste na extração de informações sobre alvos à distância e análise da radiação eletromagnética (refletida ou emitida) pelas feições do terreno. Os alvos naturais ou artificiais possuem assinaturas espectrais características que permitem a sua identificação ou reconhecimento. Quando estas assinaturas são registradas (por dispositivos que operam em determinadas faixas do espectro), sensores remotos colocados a bordo de aviões ou satélites, permitem o imageamento sinóptico e periódico da superfície e, conseqüentemente, o levantamento das informações correspondentes a estes recursos terrestres (DEGANUTTI, 2000).

As técnicas de sensoriamento remoto fornecem uma abordagem que possibilita avaliar a paisagem como uma relação de espaço (resolução espacial), de informação (resolução espectral e radiométrica) e periodicidade (resolução temporal) (WALSH et al., 1998). Segundo os autores, a resolução espectral está relacionada à área de observação e é detectada por sensores eletromagnéticos. A resolução radiométrica refere-se à quantidade de informações captadas pelo sistema sensor, sendo a resolução espacial a periodicidade de retorno de um satélite dentro de sua órbita em torno da terra. Todas as resoluções combinadas caracterizam algum local da Terra. Estas informações são apresentadas de forma matricial, que supõe que o espaço pode ser tratado como uma superfície plana, sendo cada célula associada a uma porção do terreno. A relação entre as informações entre o tamanho da célula e a área coberta por ela (sendo estas células codificadas), atribuem um código correspondente ao fenômeno estudado (ASSAD; SANO, 1998).

Esse sistema baseia todo o desenvolvimento da ciência de tecnologia de sensoriamento remoto com a concepção de plataformas orbitais, cujas estações são equipadas com vários sensores a bordo, coletando diferentes tipos de informações. As informações, coletadas sob as mesmas condições de atmosfera, de iluminação solar e de visada, possibilitam estabelecer uma intercalibração sincronizada entre esses diversos sensores, permitindo a observação continuada de mudanças globais (RUDORFF et al., 2007).

As técnicas de sensoriamento remoto possibilitam a exploração de diferentes escalas de trabalho, as quais são dependentes apenas da natureza dos estudos pretendidos (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

Giongo et al. (2010) ressaltam que o sensoriamento remoto ainda apresenta a vantagem de gerar as informações com rapidez e custo moderado, possuindo cobertura praticamente de qualquer ponto da terra.

Aplicadas desde 1970, estas metodologias proporcionaram agilidade, objetividade, consistência e precisão na tomada de decisões geoespaciais. O processamento de informações geográficas é uma atividade fundamental nas análises qualitativas e quantitativas em estudos da terra (CARVALHO; LATRUBESSE, 2004; RUDORFF et al., 2007).

Um exemplo de projeto de levantamento de informações espaciais utilizando técnicas de sensoriamento remoto é o RADAMBRASIL (1981), trabalho que resultou no Mapa de Biomas do Brasil, no Mapa de Vegetação do Brasil e nos Mapas de Cobertura Vegetal dos Biomas Brasileiros - PROBIO/MMA, que teve como objetivos cartografar e geoespacializar a vegetação brasileira (CEZARE; FERREIRA, 2011).

Com o desenvolvimento de novos modelos matemáticos e novas técnicas de sensoriamento remoto tem incrementado a adoção destes dados para Agricultura e outras áreas do conhecimento. O surgimento de empresas comerciais (*Space Image* e *Digital Globe*) tem aumentado a oferta de produtos principalmente para produtos de maior resolução (menor que 10 m). A entrada destas empresas comerciais vem incrementar a opção de escolha de imagens, atendidas por produtos de baixa resolução espacial (maior que 250 m) e média resolução espacial (menor que 10 m), possibilitando escolher o produto que melhor se adapte às necessidades técnicas e recursos financeiros disponíveis (KALLURI; BERGMAN, 2003).

Para a agricultura, a disponibilidade de informações confiáveis sobre a produção de culturas, principalmente daquelas de maior importância econômica no

mercado nacional e internacional, pode ser decisiva para investimentos e para os vários setores envolvidos no agronegócio. Rudorff e Sugawara (2007) apontam as ferramentas de sensoriamento remoto como uma alternativa viável para o fornecimento dessas informações. Segundo os pesquisadores, este uso poderia ser mais intensificado, porém os custos das imagens, a dificuldade em processar os dados, o tempo de revisita do satélite, o nível de detalhes, a disponibilidade da imagem e a incidência de nuvens são os maiores empecilhos do uso de imagens de satélites para o setor.

Deve-se somar ainda como fator complicador do uso de imagens de satélites para mapeamento agrícola, o grande número de produtores agrícolas em uma mesma região a ser mapeada, a variabilidade do tamanho das propriedades rurais e a falta de informações sobre as propriedades a serem imageadas (EIPHANIO et al., 2002).

2.2.2 Algoritmo SEBAL

O Algoritmo de Balanço Energético de Superfície para Terra (SEBAL - Surface Energy Balance Algorithm for Land) foi desenvolvido por Bastiaanssen (1995) e utiliza a temperatura da superfície, a reflectância hemisférica da superfície, índices de vegetação e alguns dados complementares de superfície, como a temperatura da superfície, a reflectância hemisférica da superfície, índices de vegetação, normalmente obtidos em estações meteorológicas automáticas (SILVA et al., 2009).

Gieske, (2003) define o algoritmo SEBAL, como um esquema de modelagem utilizado em conjunto com o perfil do método de fluxo iterativo como para aumentar a precisão dos cálculos, sendo este modelo validado sob uma grande gama de condições ambientais em vários locais do mundo como Espanha, Itália, Turquia, Paquistão, Índia, Sri Lanka, Egito, Níger, China e Estados Unidos (ANDERSON et al., 2007; BASTIAANSSEN, 2003; CROW; KUSTAS, 2005; SHEN et al., 2011).

Pesquisas nestes países confirmam a consistência do algoritmo utilizando seus resultados experimentais em comparação a fluxos medidos. Além disso, o método tem sido aplicado para avaliar as taxas de evapotranspiração por diferentes

sensores de satélite ou em uma combinação de alta resolução espacial com o de alta resolução temporal como Landsat7 ETM + / ASTER com NOAA AVHRR / MODIS. As várias aplicações demonstraram a capacidade de SEBAL para estimar a evapotranspiração diária com precisão a partir de nenhum ou poucos dados meteorológicos (SHEN et al., 2011). Calibrado e validado em uma área localizada no Vale do Guadalquivir (Espanha), a partir de uma imagem de satélite Landsat-TM5 e dados de climatologia, posteriormente, o modelo foi utilizado em uma resolução menor do que o original, através de um procedimento de agregação da imagem TM original. Esta alteração de resolução foi feita para verificar o possível uso de outros tipos de satélite imagens. Culturas, solos e mapas digitais de elevação da área de estudo área têm sido incluídos para estudar alguns dos parâmetros obtidos na determinação anterior do ET (MEDINA et al., 1998).

A caracterização precisa dos fluxos de energia de superfície e da evapotranspiração (ET) ao longo de uma gama de escalas espaciais e temporais é crítica para muitas aplicações geofísicas. O *ground-based* ou torre de observações pode fornecer valores representativos de ET para diferentes tipos de cobertura de terra, mas os dados apontam tais não podem ser facilmente extrapolados para produzir mapas precisos sobre uma paisagem ou região, devido à variabilidade natural nas propriedades físicas, tais como a umidade do solo e tipo de vegetação.

Gusmão et al. (2012) em seus estudos encontraram variação nos valores encontrados para a vegetação nativa, com os maiores valores localizados próximos aos corpos d'água, da mesma maneira que detectado por Bastiaanssen et al. (1995), quando mapearam uma região de oásis. Valores mais elevados de RN foram encontrados nos trabalhos de Silva et al. (2005b) no estado da Bahia e de Gomes et al. (2009) no estado de São Paulo, onde em áreas de cerrado, os dados computados corroboraram os resultados encontrados por Bezerra et al. (2011) para áreas com características similares, nas adjacências do município de Petrolina - PE. Em todos, os valores mais elevados de RN foram observados em áreas próximas à espelhos d'água. Por isso, algumas pesquisas têm desenvolvido muitos métodos para estimar a evaporação.

Em breve comparação entre os métodos meteorológicos ou climáticos tradicionais e os estimados pelo método de SEBAL, os métodos baseados no estudo de balanço hídrico são estimados em dados pontuais e não podem fornecer uma boa estimativa da ET em grandes áreas. Embora o método tradicional possa estimar

a evapotranspiração em uma escala de bacia hidrográfica, este é utilizado para estudos em longo prazo, geralmente anual e pode não satisfazer os requisitos de estudos de curto prazo.

Neste ponto os métodos de sensoriamento remoto com aplicação do algoritmo SEBAL podem estimar as taxas de ETA, fornecendo resultados estimados em pixel por pixel, em uma escala para períodos de tempo mais curtos sobre uma grande área (SHEN et al., 2011).

Bastiaanssen (1995) propôs o algoritmo chamado Balanço de Energia para a superfície da Terra (SEBAL), utilizando um número reduzido de entradas de dados de superfície. Este algoritmo é constituído basicamente de dados relativamente complexos de parametrizações físicas. Além disso, o algoritmo é construído de uma forma modular, o que permite modificações parciais e seu uso com os dados radiométricos com diferentes resoluções temporais e espaciais. Essas características tornam o algoritmo uma escolha adequada para obter a assimilação de fluxos de superfície de dados operacionais de tempo e modelos de previsão climática. O modelo proposto por Bastiaanssen (1995) estimou os fluxos, enquanto Paiva (2005) estimou os fluxos de energia utilizando dados do satélite NOAA-14. Para inicializar e validar a metodologia, Paiva realizou experimentos em um campo de soja em Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil, em dezembro de 1999. Os resultados estimaram o saldo de radiação e fluxo de calor sensível de forma satisfatória. Por outro lado, as estimativas de fluxo de calor no solo e fluxo de calor latente não foram satisfatórias. No entanto, quando considerados apenas os pixels 1 e 4, as estimativas de fluxo de calor latente são significativamente melhores. O pesquisador concluiu que o fluxo de calor no solo continua a ser mal estimado, porém de maneira geral, os resultados foram encorajadores, indicando uma boa estimativa para os estudos de evapotranspiração e cálculos de balanço energético.

Dadas as especificidades do trabalho e as características das áreas de estudo a escolha do algoritmo SEBAL justifica-se como base para o balanço energético radiométrico, uma vez que o método tem sido utilizado com sucesso por pesquisadores de vários países. Para a aplicação de análises de balanço energético em grandes áreas, o algoritmo requer informações mínimas de campo (temperatura e velocidade do vento, altitude do terreno) sem que haja severas distorções da qualidade dos resultados. A possibilidade de desenvolver o método com imagens Landsat também foi um fator de escolha do algoritmo, pois essas imagens possuem

um amplo banco de dados, boa resolução espacial e temporal. O algoritmo SEBAL ainda permite a extração de todas as informações utilizadas neste trabalho separadamente, sem o comprometimento dos resultados finais.

Para esse estudo, especificamente, foram utilizadas duas grandezas extraídas por este algoritmo: os comprimentos de Onda Curta Incidente e de Onda Longa Emitida, segundo as quais foi possível aplicar o algoritmo de Schneider e Kay (1992). Os resultados obtidos por meio da aplicação do algoritmo de SEBAL também possibilitaram a extração dos valores correspondentes de temperatura do solo e saldo de radiação, auxiliando na aferição dos resultados.

2.2.3 Indicadores de degradação energética

Os pesquisadores Schneider e Kay (1992) afirmaram que os sistemas tendem a alcançar a estabilidade energética por meio de uma “desordem” e que esse fenômeno é essencial para o seu desenvolvimento, favorecendo o aparecimento de mais estágios seccionais dentro de diferentes níveis tróficos. Odum (1983) descreve que esses níveis tróficos compõem diferentes cadeias, com capacidade de degradar a energia até o ponto dos ecossistemas se estabelecerem (maturação).

A busca do equilíbrio leva os sistemas mais complexos a se desenvolverem às custas da desordem, aumentando a dissipação de energia e desenvolvendo estruturas mais complexas (SCHNEIDER; KAY, 1992). Por exemplo, a eficiência ecológica dos produtores primários é mais baixa que nos outros níveis tróficos, mesmo sendo o grupo de indivíduos que melhor aproveita a energia solar (MARTINS et al., 2002).

Para as plantas, a maneira de tentar aumentar a eficiência na dissipação de energia é o crescimento basal e os processos evolutivos, como a inclusão de novos componentes na matriz de depreciação energética. Um exemplo deste processo é a floresta Amazônica, com grandes espécies arbóreas e grande biodiversidade localizada na faixa equatorial (AB'SABER, 2002). O estudo do fluxo energético é dividido entre as espécies e os diferentes níveis tróficos que degradam a energia, gerando sistemas mais complexos. Assim ecossistemas mais maduros, dissipam mais energia, promovendo maior diversidade. Conforme citam Schneider e Kay (1992), as espécies são submetidas a um “funil” e os indivíduos resultantes desse

processo contribuem para aumentar a dissipação da energia do sistema, dessa forma, ecossistemas aumentam a sua eficiência em degradar energia em cada estágio de sucessão ecológica. Os fluxos de energia e sua degradação tendem a buscar um estado de equilíbrio da entropia máxima, porém estes sistemas não são ambientes isolados, sendo constante a troca de energia e matéria (KLEIDON; LORENZ, 2004).

A fundamentação da 2ª Lei da Termodinâmica é a Entropia, no que se refere à capacidade física de degradar a energia (CIEGIS; CIEGIS, 2008). Segundo esta lei nenhuma transformação de energia acontece espontaneamente, é preciso que ocorra uma degradação da forma concentrada para uma forma desorganizada de energia, fenômeno também conhecido como a medida do caos, a medida da desordem dentro de um sistema (MATTOS; VEIGA, 2002).

Goldemberg e Lucon (2007) definem a entropia como sendo uma medida necessária para que o universo desacelere enquanto se expande, pois quando um sistema é altamente organizado, possui uma baixa entropia, porém, quando um sistema sofre uma perturbação, a resultante é uma alta entropia. Assim, sistemas mais maduros (dada à quantidade de níveis tróficos), são mais eficientes na capacidade de utilizar energia, comparados a sistemas em desenvolvimento.

Sendo a degradação energética uma função primária de qualquer sistema vivo, o entendimento da eficiência destes sistemas pode fornecer uma nova abordagem na compreensão de como se formam e se desenvolvem os ambientes. Schneider e Kay (1992) relacionam diretamente a respiração, transpiração, o ganho de biomassa e a maturidade como indicadores de uma degradação energética eficiente. Currie e Paquin (1987) relacionavam distribuição biogeográfica com a evapotranspiração e a disponibilidade de energia. Os pesquisadores ainda ressaltam que quando um fenômeno altera esta eficiência, os sistemas tendem a entrar em desequilíbrio e as consequências diretas são a perda de biomassa, o aumento da respiração e a queda na eficiência para degradar energia.

O conhecimento da análise do fluxo de energia indica as perdas energéticas de um sistema e identifica a ocorrência de desequilíbrio ou estresse, resultando em perdas de indivíduos ou perda de biomassa. Essa avaliação também proporciona a leitura do aproveitamento das entradas de energia.

Com base nestes conceitos, Schneider e Kay (1992) propuseram um índice que permitiu representar a eficiência na degradação da energia solar incidente sobre um

determinado sistema e a comparação energética (baseada na degradação da energia) entre diferentes ecossistemas. A metodologia adotada utilizou um scanner infravermelho multispectral em um avião, que sobrevoou diferentes paisagens com o objetivo de determinar a degradação energética destes sistemas. Foram avaliados como alvos do estudo (conforme tabela 1): uma área sem vegetação (onde anteriormente existia uma floresta), uma pedreira, uma floresta de regeneração natural (com 23 anos), uma floresta plantada (com 25 anos), uma floresta natural em estágio avançado de maturidade (400 anos), cujos principais parâmetros utilizados foram:

- a) Onda curta incidente;
- b) Onda longa emitida;
- c) Temperatura.

Tabela 1. : Dados relativos ao BE utilizando o algoritmo de Schneider e Kay (1992).

Parâmetro	Pedreira	Clareira	Floresta Plantada	Floresta Natural	Floresta Natural 400 anos
Onda Curta Incidente ($W\ m^{-2}$)	718,00	799,00	854,00	895,00	1005,00
Onda Longa Emitida ($W\ m^{-2}$)	273,00	281,00	124,00	124,00	95,00
Balanco Energético ($W\ m^{-2}$)	445,00	517,00	730,00	771,00	830,00
Temperatura ($^{\circ}C$)	50,70	51,80	29,90	29,90	24,70
Balanco Energético em (%)	62,00	65,00	85,00	86,00	90,00

Fonte: Schneider e Kay (1992)

Neste estudo observou-se que as áreas de vegetação mais madura apresentaram as menores temperaturas e as áreas sem vegetação, temperaturas mais elevadas. Segundo Luvall e Holbo (1989) e Luvall et al. (1990) apud Schneider e Kay (1992), os resultados dos dados obtidos por um scanner multiespectral com seis canais térmicos (comprimento de onda de 8,22m a 12,20 m) ao sobrevoarem uma área de pastagem, uma área de floresta queimada e uma área de floresta, determinaram que as áreas queimadas (sem vegetação) tiveram as maiores

temperaturas, seguida pela área de pastagem e pela área de floresta, resultados em concordância com os estudos de Schneider e Kay (1992).

Além da temperatura, os pesquisadores utilizaram os dados de onda longa incidente (K^*) e da onda longa emitida (L^*), calor latente, calor no solo e calor sensível. A partir destes dados, foi possível determinar a eficiência em degradar a energia de cada sistema, quanto mais “maduro” e menos “alterado” for o ambiente, melhor degrada a energia. Schneider e Kay (1992) ressaltam que estes ambientes têm maior capacidade de diminuir a temperatura de superfície, dada a capacidade de converter energia em processos biofísicos, principalmente a evapotranspiração. Este fato pode ser explicado pela teoria dos pesquisadores, segundo a qual, ecossistemas mais complexos dissipam a energia por mais caminhos (níveis tróficos) que ecossistemas com mais simples e conseqüentemente estão mais preparados para resistirem às perturbações externas.

A temperatura da superfície é tida como um elemento de grande valor nos processos físicos que envolvem a superfície terrestre, em escala regional e global. Está relacionada aos balanços de energia, evaporação, transpiração, desertificação e pode ser utilizada como indicador de degradação terrestre e de mudança climática (ARAÚJO, 2006). Schneider e Kay (1992) ressaltam que ecossistemas mais maduros têm menor temperatura de superfície, uma vez que estes ambientes possuem mecanismos mais eficientes de degradação, convertendo os fluxos energéticos em energia não aproveitável.

Assim, segundo os estudos de Schneider e Kay (1992), a temperatura e os estudos radiométricos podem ser indicadores de integridade ecológica no sistema, possibilitando inclusive a comparação entre diferentes biossistemas. Os estudos de Fluxo de Energia e de Calor também podem fornecer informações quanto à dissipação de calor e da evapotranspiração da planta, condicionantes para diminuir a entropia do sistema e buscar seu equilíbrio.

Corroborando neste entendimento Strakraba et al. (1999), ressalta que esta dissipação pode indicar a condição, a estrutura, o desenvolvimento e a evolução de sistemas biológicos. As relações de dissipação entre os organismos podem indicar determinadas características ecológicas destes sistemas. A proposta de adoção da dissipação para estudos de produção do ecossistema pode alterar as idéias clássicas de eficiência ecológica, biodiversidade e pirâmides ecológicas.

Addiscott (2010) aponta ainda a transpiração como o principal mecanismo de dissipação da energia dentro de um sistema ecológico. A maior eficiência em dissipar energia, é apontada pelo pesquisador como um componente evolutivo das plantas. O pesquisador destaca que a planta com maior eficiência de transpiração, produz a maior biomassa por unidade de água transpirada e teria vantagem em um processo evolutivo. Um exemplo de eficiência de transpiração são as plantas C4, nativas de climas quentes, o estudo de transpiração indica que a eficiência no uso da água e não a maximização das perdas de água (por transpiração) foi a fórmula de sucesso destas plantas no processo competitivo. Baseado nessas considerações, Addiscott concluiu ainda que a transpiração é um infeliz efeito colateral da fotossíntese, que o processo evolutivo das plantas tentou minimizar.

Segundo essa teoria, a aferição da capacidade de dissipar os fluxos energéticos, pode ser utilizado como parâmetro de análise quanto à complexidade trófica, estresse ou envelhecimento de biossistemas, uma vez que nestes casos, estes sistemas têm uma queda na capacidade de degradar energia (TOUSSAINT; SCHNEIDER, 1998). Ulanowicz (2004) relaciona a eficiência ecológica de um ecossistema com a capacidade dissipar energia, sendo que os ambientes mais eficientes são aqueles que melhor converteram essa dissipação em trabalho.

2.3 Fluxos de energia na intensificação da produção

O uso eficiente de energia na agricultura deve minimizar os problemas ambientais, prevenindo a destruição dos recursos naturais e promovendo o desenvolvimento sustentável como um sistema de produção econômica. A agricultura usa energia diretamente como combustível, eletricidade para operar máquinas e equipamentos, para aquecer ou refrigeração de edifícios, para a iluminação de fazendas direta e indiretamente, nos fertilizantes e produtos químicos produzidos fora da fazenda. A participação da energia nas despesas de produção agrícola varia amplamente dependendo da atividade, da prática produtiva e localidade. A análise de energia de entrada-saída é geralmente usada para avaliar os impactos ambientais, de eficiência e da produção dos sistemas (ERDAL, 2005).

A análise da produtividade deve considerar os índices agregados de todos os produtos da agropecuária e de índices de insumos usados na produção. Antes da

adoção de uma cultura agrícola como matéria prima para geração de energia deve-se investigar o real valor calorífico desta “fonte energética”, avaliando o máximo possível de informações sobre gestão desta produção agrícola, formas de armazenamento, estocagem e localização geográfica das áreas de plantio (BRAND, 2007).

Os processos de geração e beneficiamento da produção agrícola com a finalidade do uso da biomassa, como fonte energética, necessitam de estudos termodinâmicos específicos que envolvam a conversão energética. A identificação e quantificação dos caminhos da energia podem ajudar no gerenciamento de técnicas agrícolas, buscando outros fatores de apoio à tomada de decisão sobre a adoção ou não de uma cultura agrícola como fonte de energia (RIPOLI, 2000). O entendimento dos fluxos energéticos de um sistema contribui para uma análise da qualidade da energia, examinando as situações de cada região (Goldemberg e Lucon, 2008), além de mapear a incorporação de materiais, permitindo análises ambientais e econômicas sobre o plantio (ROMANELLI, 2007).

A metodologia de avaliação de fluxos de energia visa identificar sua demanda total e eficiência, refletida pelo ganho líquido total e pela relação saída/entrada, além da quantidade necessária para produzir ou processar um quilograma de determinado produto. Nesse processo, quantificam-se todos os insumos utilizados e produzidos que são transformados em unidades de energia (FERNANDES et al., 2008).

A utilização de balanços de energia pode constituir-se em um importante instrumento para definição de novas técnicas e manejos agropecuários, que podem vir a proporcionar importante economia de energia e conseqüentemente, aumento de eficiência e redução dos custos de produção, em sistemas de produção mais tecnificados, que possuem utilização intensiva de energia em suas várias formas (CAMPOS; CAMPOS, 2004).

Barut et al. (2011) define que todas as entradas e saídas de um sistema de cultivo podem ser expressas em termos de energia. Daí entrada e saída de energia. A análise é usada para determinar a eficiência de energia e impactos ambientais da produção agrícola. Esta análise é importante para executar as melhorias necessárias que conduzam a um sistema de produção mais eficiente e ecologicamente correto. Do ponto de vista energético, um funcionamento agrícola eficiente é definido por como e onde a energia incorporada nas saídas é maior do

que as entradas. Esta razão entre *input* e *output* é específica para cada local e deve ser considerada para cada sistema.

Gazzoni et al. (2005) ressalta que o balanço energético (BE) pode ser utilizado como parâmetro para definir a viabilidade técnica de um programa de agroenergia. Para ser positivo, o BE depende de diversos fatores, em especial do rendimento da cultura e do menor consumo de fertilizantes nitrogenados, que demandam grande quantidade de energia para sua produção. Assim, alguns dos desafios da pesquisa agropecuária são aumentar a produtividade da cultura e o teor de óleo do grão e promover a utilização da adubação verde e da fixação simbiótica como fonte de N, além do menor uso de máquinas e implementos. A energia consumida no sistema de produção de uma cultura não é de fácil determinação, pois depende de muitos fatores. É necessário estimar a energia consumida em todo o processo produtivo, desde a fabricação de máquinas e implementos, a produção de insumos, a semeadura, o manejo e a colheita, até o transporte do produto agrícola ao local de processamento.

Siqueira et al. (1999) e Hetz et al. (1994) descrevem que o balanço energético visa estabelecer os fluxos de energia, identificando a demanda total, a eficiência refletida pelo ganho líquido e pela relação produção/demanda, além da quantidade necessária para produzir ou processar um determinado produto. Os pesquisadores observam que o balanço é um fator de fundamental importância para a eleição de uma matéria-prima para a produção de energia e nesse processo, uma vez que a metodologia identifica e quantifica todos os insumos utilizados na produção agrícola. Por meio desta análise, pode-se medir a eficiência energética de um sistema agroecológico. Quadros e Kokuszka, (2007) citam o exemplo: Para se produzir um alimento, se tem uma de entrada 0,73 MJ, para uma saída de 1 MJ a mais, trata-se de um sistema que trabalhou melhor energeticamente, quando comparado a outro sistema, que teve um gasto energético maior que 0,73 MJ para uma maior e uma produção menor que 1 MJ.

Deve-se lembrar que o ganho líquido de energia é definido como a diferença entre a energia no produto combustível (energia de saída) e da energia necessária para produzir o produto (energia de entrada). Esse valor é muitas vezes expressa como uma percentagem da energia de entrada. As análises energéticas consideram como energia de entrada, ciclos de energias de produção; por exemplo, para a gasolina, inclui a energia necessária para a extração e refinação de petróleo bruto.

Usando o dados de pesquisas de energia para as necessidades agrícolas e uso de usina de etanol, estimou-se que o ganho líquido de energia para o etanol de milho é entre 21 e 34 % (ANDRESS, 2002).

Deleage et al. (1979) coloca o cálculo da eficiência produtiva sob a ótica energética, possibilitando a elaboração de indicadores comparativos, onde considera, além dos aspectos ecológicos, os técnicos, sócio-econômicos e administrativos entre os sistemas de produção. Este método conhecido como análise ecológica-energética objetiva a comparação do desempenho técnico administrativo entre unidades produtivas e procura uma abordagem antropológica no sentido de interligar os parâmetros energéticos aos econômicos, sociais e culturais, na gestão dos recursos naturais dos sistemas socioeconômicos. Estes elementos estão reunidos em quatro grandes grupos: os que caracterizam o sistema de produção, tal como a superfície agrícola útil (SAU); os que caracterizam os fatores de produção como unidades homem de trabalho (UHT); aqueles que caracterizam os resultados e os encargos, como, por exemplo, o rendimento bruto (RB) e os elementos-chave expressos sob a forma de índices de produtividade, como produtividade global dos fatores (PGF) (COMITRE,1993).

Ao conciliar os estudos de balanço energético aos conceitos de gerenciamento agrícola, pode-se então conhecer os caminhos da energia dentro de sistemas, mapear suas causas e conseqüências e deste modo, prever suas eventuais perdas ou ganhos, tentando assim, conciliar a otimização energética à econômica (ODUM, 1996).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para a análise da intensificação dos sistemas de produção de biomassa, adotaram métodos para relacionar o uso de insumos com a degradação da energia solar incidente utilizando as técnicas de balanço energético radiativo e fluxos de energia.

3.1 Áreas avaliadas

Considerando o potencial energético e viabilidade das culturas mais presentes no Brasil, foram escolhidos a cana-de-açúcar e o eucalipto para a realização dos estudos, incluindo-se depois, a floresta natural (estacional semidecidual) como forma de parametrizar os resultados.

Para verificar a validade de análises por meio de imagens de satélite, a metodologia adotada foi baseada nos estudos sobre degradação de energia de Schneider e Kay (1992) e Luvall e Holbo (1989). Nesses trabalhos, os pesquisadores utilizaram um scanner multispectral com seis canais térmicos - Infrared Multispectral Scanner (TIMS).

Considerando os principais dados utilizados nas pesquisas citadas (Onda Curta Incidente, Onda Longa Emitida e Temperatura), para a detecção da degradação energética das áreas de estudo foram utilizadas imagens de Satélite Land Sat 5.

Para a aplicação do Balanço Energético Radiométrico, os principais parâmetros utilizados na produção das informações foram: Onda Curta Incidente (K^*), Onda Longa Emitida (L^*) e Temperatura (T^*), porém, foram utilizados ainda os dados referentes ao Saldo de Radiação (RN), extraídos das imagens de satélites por meio da aplicação do algoritmo SEBAL.

3.1.1 Caracterização da área de cana-de-açúcar

Para os estudos de fluxo de energia no cultivo de cana de açúcar foram escolhidas duas áreas do município de Tarumã (Figura 2), estado de São Paulo.

Figura 2 – Croqui de localização área de cultivo de cana-de-açúcar

A primeira área possui 1.357 ha localizada na coordenada central 22°42'32" latitude S e 50°37'41" longitude W. A segunda possui 1.707 ha nas coordenadas 22°43'17" latitude S e 50°35'50" longitude W. A escolha das áreas considerou lotes onde houve monitoramento de um ciclo total de cultivo (do primeiro ao sexto corte). um município localizado na região oeste do estado de São Paulo, a 460 km da capital, localiza-se a 22°44'48" latitude S e 50°34'38" longitude W, a 509 metros de altitude e segundo classificação de Koppen, o clima é classificado como tropical de atitude Aw (CEPAGRI, 2012).

3.1.2 Caracterização da área de eucalipto

A área de estudo encontra-se a 23°14'25" latitude S e 48°30'40" longitude W, no município de Itatinga – SP (Figura 3). O clima da região é tropical Aw, sendo as vegetações predominantes, o cerrado e a mata atlântica (CBH – PARANAPANEMA, 2010).

Figura 3 – Croqui de localização área cultivo eucalipto

3.1.3 Caracterização da área de floresta natural

As áreas de estudo estão localizadas no município de Gavião Peixoto (Figura 4) do estado de São Paulo, criado em 27 de dezembro de 1995. Possui território de 243,7 km² e localiza-se a 21°50'20" latitude S e 48°29'41" longitude W, a uma altitude de 515 metros. Sua população estimada em 2010 era de 4.419 habitantes. O clima da região é tropical de altitude Aw, onde predomina a vegetação tipo cerrado e cerradão. O clima dessa unidade de gestão, pela classificação de Koppen, situa-se entre clima tropical úmido (de outubro a março) e inverno seco (de abril a setembro).

Figura 4 – Croqui de localização área de floresta

As áreas de florestas estão localizadas no município de Gavião Peixoto sendo a área “A” localizada aproximadamente em 21°50’14” latitude S e 48°34’23” longitude W com 182 ha. A área “B” possui 146,02 ha localizada na 21°51’25” latitude S e 48°32’44” longitude W (Figura 4). A escolha desta área foi motivada pelo fato da mesma estar averbada há mais de 50 anos e em processo avançado de regeneração.

As duas áreas de reserva florestal com 182,02 ha (Polígono A) e 146,50 ha (Polígono B) de floresta estacional semidecidual estão em estágio avançado de desenvolvimento. Ramos et al. (2008) descrevem este tipo de floresta como composta por árvores de grande porte, com folhas que caem durante a estação seca, como resposta à escassez de água. Esta característica permite o surgimento de plantas exigentes de luz em seu interior, proporcionando a formação de sub-bosque. Consta-se em registro do imóvel, que a averbação das áreas foi efetuada há mais de 50 anos.

3.1.4 Escolha das imagens

Para o desenvolvimento dos estudos radiométricos, foram escolhidas imagens do Satélite Landsat 5, de órbita 221/75, 222/76 e 220/76. O parâmetro de escolha das imagens foi a cobertura de nuvens sobre a área do projeto (0%) e o ângulo de incidência do satélite igual para todas as imagens, sendo que este deve sempre estar o mais próximo do Nadir (0° de inclinação).

A escolha destas imagens considerou ainda a disponibilidade do banco de dados, a existência de acervo de imagens sobre as áreas escolhidas nos períodos interessantes ao estudo, além dos parâmetros radiométricos e da adequação de escala espacial e precisão geométrica necessária.

3.1.5 Dados das imagens Landsat utilizadas nas análises

Foram utilizadas 55 imagens do Satélite Temático (TM) do Landsat 5, sendo que cada área de estudo foi analisada em cada ano de seu ciclo agrícola com pelo menos três passagens do satélite. As imagens são compostas por sete bandas espectrais, sendo suas características detalhadas conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Características espectrais e espaciais do sensor TM e suas aplicações

Bandas	Comprimento de Onda (µm)	Região do Espectro	Resolução Espacial (m)
1 (azul)	0,45 – 0,52	Azul	30
2 (verde)	0,52 – 0,60	Verde	30
3 (vermelho)	0,63 – 0,69	Vermelho	30
4 (IV-próximo)	0,76 – 0,79	Infravermelho Próximo	30
6 (IV-termal)	10,40 – 12,50	Infravermelho Termal	120
7 (IV-médio)	2,08 – 2,35	Infravermelho Médio	30

Fonte: Arraes (2010)

As imagens foram selecionadas sob a principal condição de estarem livres de nuvens e processadas pelo software Erdas Imagine 9.3, onde foram empregados os processos de recorte das cenas, correção radiométrica, equalização das bandas.

Para as etapas computacionais do algoritmo SEBAL, foi necessário o uso de linguagem de programação no modo *Model Maker* do software de processamento de dados Erdas 9.0.

O posicionamento das imagens sobre a área de interesse foi realizado com o Software Arc Gis 10.0 no módulo de georeferenciamento, assim como as operações de conversão dos dados raster para pontos (*Modo Spacial Analyst*) e a interpolação dos dados para a geração de mapas temáticos.

Para as análises de cana-de-açúcar, foram utilizadas 18 imagens de satélites coletadas entre os anos de 2005 a 2010. Para o ano de 2005, foram utilizadas as imagens dos dias 20 de fevereiro, 3 de abril e 9 novembro. Para o ano de 2006, as dos dias 12 de abril, 06 de setembro e 22 de novembro. No ano de 2007, as imagens foram as dos dias 30 de março, 20 de julho e 6 de setembro. Para o ano de 2008 as imagens utilizadas foram as de 24 de abril, 26 de agosto e 29 de outubro. Em 2009 as imagens processadas foram dos dias 24 de abril, 26 de agosto e 29 de outubro. E finalizando o período (ano de 2010), foram utilizadas as imagens dos dias 7 de abril, 29 de agosto e 1º de novembro.

As análises da área de eucalipto basearam-se em 18 cenas no intervalo entre os anos de 2000 a 2007. Para o ano de 2000, foram analisadas as imagens de 29 de abril, 20 de setembro e 22 de outubro. No ano de 2001, as imagens analisadas foram dos dias 08 de junho, 21 de julho e 25 de outubro. No ano de 2002 não foram coletadas imagens na área do projeto. No ano de 2003 foram utilizadas cenas dos dias 12 de agosto e do dia 15 de outubro. Para o ano de 2004 foram processadas as cenas dos dias 8 de abril, 30 de agosto e 9 de novembro. Em 2005 as imagens foram coletadas nos dias 1 de agosto, 3 de outubro e 21 de novembro. No ano de 2006 as imagens utilizadas formam as dos dias 14 de abril, 15 de maio e 19 de julho. O ano de 2007 foram utilizadas imagens de 8 de julho e 8 de setembro. A cobertura das imagens correspondentes as área de floresta foram realizadas entre os anos de 2000 e 2002. Dada as características da área e a baixa atividade antrópica registrada, o período de análise foi bianual, com cenas nos anos de 2000 (22 de maio e 13 de outubro), 2002 (cenas de 5 de fevereiro e 4 de outubro), 2004 (cenas dos dias 4 de março, 8 de junho, 22 de setembro e 25 de novembro), 2006 (cenas dos dias 21 de junho, 8 de setembro e 1 de dezembro), 2008 (cenas dos dias 16 de abril, 21 de junho e 15 de julho) e 2010 com cenas de 19 de junho e 22 de agosto.

3.2 Balanço energético radiativo

Para a análise do rendimento agrícola por intermédio dos estudos de fluxos energéticos, foram utilizadas ferramentas de sensoriamento remoto e aplicação de parte do algoritmo SEBAL, empregado para extração dos valores de onda longa emitida e onda curta incidente. Para o cálculo de Balanço Energético, foi aplicada a metodologia de Schneider e Kay (1992), segundo o qual os resultados dos fluxos energéticos de entrada e saída de energia indicam o sistema mais eficiente em degradação da energia incidente sobre ele.

3.2.1 Aplicação do algoritmo SEBAL

O algoritmo SEBAL (Figura 5) conjuga dados do local e da vegetação analisados.

Figura 5 – Fluxograma etapas SEBAL

Fonte: Silva (2005)

O algoritmo SEBAL foi utilizado para fornecer os valores de onda longa emitida, onda curta incidente e temperatura do solo, para tanto foram utilizadas imagens de Satélite Landsat 5, em períodos diferentes sobre as áreas de cana-de-açúcar, eucalipto e floresta natural.

3.2.2 Processamento das imagens Landsat

O cálculo de radiância espectral das imagens deve ser efetuado em cada banda, calibrando radiometricamente. Este é o processo pelo qual cada número digital da imagem (ND) é convertido em radiância espectral monocromática, representando a energia solar refletida de cada pixel por unidade de área, de ângulo e comprimento de onda (ARRAES, 2010). A equação base para os cálculos foi proposta por Chander e Markhan (2003):

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} ND \quad (1)$$

Em que onde a e b são os coeficientes espectrais de calibração (tabela 6), ND é a intensidade do pixel (número digital – número inteiro de 0 a 255); ND é a intensidade do ND da imagem (Pixel de 0 a 255) e i corresponde as bandas de 1 a 7 do satélite Landsat 5 – TM. (SILVA, 2005).

Tabela 6 - Descrição das bandas do mapeador temático (TM) do satélite Landsat 5

Bandas	Comprimento de Onda (μm)	Coeficientes de Calibração ($\text{W m}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)		Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera ($\text{W m}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$)
		a	b	
1 (azul)	0,45 – 0,52	-1,76	178,94	1957,00
2 (verde)	0,52 – 0,60	-3,58	379,05	1829,00
3 (vermelho)	0,63 – 0,69	-1,50	255,70	1557,00
4 (IV-próximo)	0,76 – 0,79	-1,76	242,30	1047,00
5 (IV-médio)	1,55 – 1,75	-0,41	30,18	219,30
6 (IV-termal)	10,40 – 12,50	1,24	15,60	-
7 (IV-médio)	2,08 – 2,35	-0,14	13,15	74,52

Fonte: Liu (2007)

3.2.3 Reflectância

O cálculo de reflectância representa o resultado da reflectância monocromática de cada banda (ρ_{λ_i}), definida como sendo o resultado entre o fluxo de radiação refletida e o fluxo de radiação incidente obtida pela equação abaixo (SILVA, 2005):

$$\rho_{\lambda_i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda_i}}{k_{\lambda_i} \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (2)$$

Em que L_{λ_i} representa a radiância de cada banda espectral, k_{λ_i} é a irradiância solar espectral das bandas no topo atmosférico ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$, Tabela 1), Z é o ângulo zenital solar e d_r ano (DJ), que segundo Iqbal (1983, apud Silva, 2005) é dada por:

$$\left(\frac{r_o}{r}\right)^2 = 1,000110 + 0,034221\cos\Gamma + 0,001280\sin\Gamma + 0,000719\cos 2\Gamma + 0,000077\sin 2\Gamma \quad (3)$$

sendo $\Gamma = 360(\text{DJ} - 1) / 365$ ($^\circ$) onde DJ é o dia juliano.

3.2.4 Albedo planetário

O Albedo Planetário (α_{toa}), é o albedo não ajustado pela transmissividade atmosférica, dada pela combinação linear das reflectâncias monocromáticas:

$$\alpha_{\text{toa}} = 0,293\rho_1 + 0,274\rho_2 + 0,233\rho_3 + 0,157\rho_4 + 0,033\rho_5 + 0,011\rho_7 \quad (4)$$

Em que $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5$ e ρ_7 são os respectivos albedos planetários das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7.

3.2.5 Albedo de superfície

O Albedo Planetário tem grande importância na determinação do balanço de radiação uma vez que representa a reflexão da superfície para a onda curta (ARRAES, 2010). Meirelles (2007) corrige os valores obtidos por meio do albedo atmosférico que sofre interferência dos processos de absorção e espalhamento ocorridos no topo da atmosfera, obtidos pela equação 4 (ALLEN et al., 2002; SILVA, 2005):

$$\alpha = \frac{\alpha_{\text{toa}} - \alpha_p}{\tau_{\text{sw}}^2} \quad (5)$$

Em que α_{toa} é o albedo planetário, e α_p a da radiação solar refletida pela atmosfera (variação entre 0,025 e 0,04) , mas segundo Bastiaanssen (2000) é recomendado o uso do valor de 0,03. Para os cálculos do Albedo de Superfície é necessária a determinação da transmissividade τ_{sw} , obtida na equação 6 (ALLEN et al., 2002):

$$\tau_{\text{sw}} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z \quad (6)$$

Em que z representa altitude de cada pixel (m). Para aplicação deste algoritmo, as alturas de cada área de estudo foram extraídas de cartas topográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

3.2.6 Temperatura da superfície

Para o cálculo de temperatura das superfícies (T_s), serão utilizados os valores de radiância da banda termal do satélite Landsat -5 ($L_{\lambda,6}$). Para a obtenção da temperatura da superfície são utilizados a radiância espectral da banda termal e a emissividade ε_{NB} obtida nas etapas anteriores. Dessa forma, obtém-se a temperatura da superfície (K) pela seguinte expressão:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (7)$$

Em que $K_1 = 607,76 \text{ W m}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ e $K_2 = 1260,56\text{K}$ constantes para calibração da banda termal do Landsat 5 – $L_{\lambda,6}$ (ALLEN et al., 2002; SILVA, 2005).

3.2.6.1 Validação dos valores de temperatura de superfícies

Os valores referentes à temperatura de superfície oriundos do processamento das imagens de satélites foram confrontados com as temperaturas levantadas por estações meteorológicas localizadas nas propriedades estudadas, ou de dados climáticos sobre a região, correspondentes às mesmas datas das imagens de satélites. Para efeitos de validação dos resultados, foi considerada uma variação de até 10% entre os valores obtidos. Para os casos em que as temperaturas de superfície apresentaram uma variação maior que 10%, a imagem foi descartada e substituída por outra cena no intervalo de data correspondente ao mesmo período do estudo.

3.2.7 Radiação de onda longa emitida

A radiação de onda longa é emitida pela superfície $R_{L\uparrow}$ (W m^{-2}) e foi obtida através da equação de *Stefan-Boltzman* (SILVA, 2005; ARRAES, 2010).

$$R_{L\uparrow} = \epsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (8)$$

Em que ϵ_0 é a emissividade de cada pixel, σ é a constante de *Stefan-Boltzman* ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$) e T_s é a temperatura da superfície (K).

3.2.8 Radiação de onda curta incidente

A radiação de onda curta incidente $R_{s\downarrow}$ ($W\ m^{-2}$) foi calculada para cada pixel, de acordo com a equação 10 (ALLEN et al., 2002):

$$R_{s\downarrow} = S \cdot \cos Z \cdot d_r \cdot \tau_{sw} \quad (9)$$

Em que: S é a constante solar ($1367\ W\ m^{-2}$) Z é ângulo zenital solar, d_r sendo o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica (ARRAES, 2010).

3.2.9 Radiação de onda longa incidente

O valor de onda longa incidente emitida da superfície $R_{L\downarrow}$ ($W\ m^{-2}$) pode ser computada pela equação de Stefan-Boltzman, conforme expressão 10:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (10)$$

Em que σ é a constante de Stefan-Boltzman e T_a é a temperatura do ar (K)⁴. O valor de ε_a é a emissividade atmosférica obtida por:

$$\varepsilon_a = 0,85 \cdot (-\ln \tau_{sw})^{0,09} \quad (11)$$

Em que o valor de τ_{sw} é calculado na fórmula 06.

3.2.10 Saldo de radiação

Segundo Silva (2005), o saldo de radiação à superfície R_n ($W\ m^{-2}$) é calculado utilizando-se a seguinte equação do balanço de radiação à superfície:

$$R_n = R_{s\downarrow} + \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_o) R_{L\downarrow}$$

(12)

Em que $R_{s\downarrow}$ é a radiação de ondas curtas incidente, α é o albedo corrigido de cada pixel, $R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel, $R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda longa emitida por cada pixel e ε_o é a emissividade de cada pixel.

3.2.11 Índice de eficiência em degradação energética

O este índice aponta o quanto o sistema foi eficiente na degradação da energia, sendo a razão dos valores do Balanço Energético Rn divididos pelos valores da Onda Curta Incidente, $R_{s\downarrow}$ conforme equação (SCHNEIDER; KAY, 2002):

$$D\% = Rn / R_{s\downarrow} \quad (13)$$

Em que o valor de Rn é extraído da fórmula 12 e o valor de $R_{s\downarrow}$ (Onda Curta Incidente) é extraído pela fórmula 9.

3.2.12 Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI)

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) é obtido através da razão entre a diferença das refletividades das bandas do infravermelho próximo e do vermelho pela soma das mesmas (SILVA, 2005):

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (14)$$

onde ρ_{IV} e ρ_V correspondem, respectivamente, as bandas 4 e 3 do Landsat 5 – TM.

Sendo que P_{IV} corresponde a banda 4 satélite Landsat 5 e o P_V a banda vermelha do mesmo sensor.

3.3 Análise do balanço energético operacional

A fim de comparar os resultados obtidos por intermédio do Balanço Energético Radiométrico, foram utilizados os valores obtidos em estudos de Balanço Energético por Fluxo de Massa, realizados nas respectivas áreas de estudos. O cálculo de demanda energética segue a metodologia proposta por Bueno (2002) e Romanelli (2007) que consideram para operações mecanizadas a capacidade operacional, consumo, vida útil e depreciação de máquinas e implementos.

3.3.1 Análise de fluxo energético cana-de-açúcar

O estudo de Balanço Energético da área indica uma entrada de energia de referente às ações antrópicas. Para se determinar o valor de energia inserida no sistema referente às operações agrícolas (Tabela 7), o emprego de mão de obra (Tabela 8) e os insumos incidentes sobre o cultivo (Tabela 9). O cálculo de demanda energética segue a metodologia proposta por Bueno (2002) e Romanelli (2007). Para os cálculos de demanda energética em operações mecanizadas, consideraram-se os cálculos de capacidade de campo operacional, consumo, estimativas de vida útil e depreciação de máquinas e implementos.

3.3.2 Fase plantio – principais operações mecanizadas

O estudo de Balanço Energético da área indica uma entrada de energia de referente às ações antrópicas. Para se determinar o valor de energia inserida no sistema referente às principais operações agrícolas empregadas na área de cana-de-açúcar (Tabela 7), o emprego de mão-de-obra (Tabela 8) e os insumos incidentes sobre o cultivo (Tabela 9).

Tabela 7 - Dados de operações agrícolas para cultivo de cana-de-açúcar

Operações	Tipo Maquinário	Potência (kw)	Quantidade (h ha)
Sulcação e adubação	Trator+Sulcador 2 Linhas	187,60	2,00
Cobrição	Trator + Cobridor 2 Linhas	113,90	1,00
Pulverização	Pulverizador Barra 12 m	113,90	1,60
Quebra Lombo	Trator + Quebra Lombo	147,40	1,00
Transporte de insumos	Carreta 6 t	113,90	0,02

3.3.2.1 Capacidade de campo operacional

O cálculo da capacidade de campo operacional (CcO) é um fator importante para a definição da demanda de material e serviços dentro dos sistemas agrícolas (ROMANELLI, 2007) e leva em conta o tempo de combustível, mão-de-obra e depreciação do maquinário.

$$CcO = \frac{V * L}{10} * Efc \quad (15)$$

Em que:

CcO = Capacidade de campo operacional (ha h⁻¹);

V = velocidade de operação (km h⁻¹);

L = largura do implemento (m);

Efc = eficiência de campo (decimal).

3.3.2.2 Mão-de-obra

Resume-se ao conjunto de atividades de mão-de-obra empregada, exclusivamente na fase de plantio, em horas por unidade de área (hectare) conforme Tabela 8, conforme Romanelli (2007).

Tabela 8 - Dados de mão-de-obra empregada no plantio

Operação	Quantidade (h ha⁻¹)
Fiscal de campo	0,02
Carpa química (cana-planta)	0,63
Carpa manual repasse (cana-planta)	2,70
Plantio	1,88
Combate à formiga	0,50

3.3.2.3 Insumos

Para os cálculos das entradas do fluxo energético por meio de insumos foram utilizados os parâmetros da recomendação agronômica aplicada à área pelos técnicos da propriedade (Tabela 9). Os valores energéticos contidos em cada insumo foram multiplicados por seus respectivos coeficientes energéticos.

Tabela 9 - Dados de insumos

Insumos	Unidade	Quantidade (Unidade ha⁻¹)
Fertilizante 05 - 25 - 25	kg	500,00
Calcário dolomítico	kg	2.500,00
Fosfatagem	kg	150,00
Gesso agrícola	kg	1.500,00
Herbicidas thebutiuron	L	2,00
Herbicida Ametrina	L	3,00
Herbicida 2,4D folha larga	L	0,60
Inseticida Fipronil Regent 800WG	kg	0,25
Mudas	t	16,00

3.3.2.4 Cálculo de energia incidente

Identificadas as fase do plantio e respectivas entradas de energias incidentes sobre o sistema, determinou-se a energia de entrada conforme Tabela 10.

Tabela 10 - Dados de energias incidentes

Fluxo de Materiais	Unidade	Fluxo de material (Unidade ha⁻¹)
Mão-de-obra	h	11,35
Consumo	L	73,52
Depreciação	kg	7,26
Fertilizante 05 - 25 - 25	kg	500,00
Calcário dolomítico	kg	2.500,00
Fosfatagem (Arad)	kg	150,00
Gesso agrícola	kg	1.500,00
Herbicidas thebutiuron	L	2,00
Herbicida AMETRINA	L	3,00
Inseticida Fipronil	kg	0,25
Mudas	t	16,00
Herbicida 2,4D	L	0,60

3.3.3 Operação de colheita

Para se determinar a entrada e saída de energia dentro do sistema, foi utilizado como parâmetro o ciclo de cinco cortes do cultivo da cana-de-açúcar, sendo para cada corte foi determinado a demanda energética nas fases de Operação Mecanizada, Operação Manual e Aplicação de Insumos.

3.3.3.1 Operações Mecanizadas

O conjunto de operações mecanizadas, para a fase de colheita, incluem-se as operações de conservação de carregadores, desaleiramento da palha, juntamente com as operações de pulverização, adubação e transporte, conforme Tabela 11.

Tabela 11 - Dados de operações mecanizadas

Operações	Tipo Maquinário	Potência (kW)	Quantidade (h ha⁻¹)
Conservação de carregadores	Trator+Sulcador 2 Linhas	124,90	0,02
Pulverização	Trator + Cobridor 2 Linhas	84,93	0,80
Carreta – Transporte de adubo	Pulverizador Barra 12 m	84,93	0,30
Desaleiramento palha	Trator + Quebra Lombo	84,93	0,40
Adubação	Carreta 6 t	139,90	1,90
	Colhedora JD 3520	341,74	2,58
	Trator MF7180 + Transbordo	179,87	2,58
Colheita	Caminhão + Julieta	309,77	2,58

3.3.3.2 Operações Manuais

As principais operações onde foi empregada mão-de-obra: operação de máquinas agrícolas, capina química, capina manual, plantio e combate à formiga, conforme Tabela 12.

Tabela 12 - Demanda de mão-de-obra nas operações manuais

Operação	Quantidade (h ha⁻¹)
Operadores de máquina	5,62
Fiscal de campo	0,02
Carpa química (cana-planta)	0,60
Administração de cultivo	0,03
Combate à formiga	0,50

3.3.3.3 Insumos

Os insumos incidentes no sistema estão detalhados na Tabela 13 e foram descritos conforme a recomendação técnica da propriedade.

Tabela 13 - Demanda de insumos

Insumos	Unidade	Quantidade (Unidade ha⁻¹)
Fertilizante 05-25-25	kg	400,00
Herbicida Provence	kg	0,14
Herbicida Plateau	kg	0,15
Herbicida 2,4 D	kg	0,60
Catção química	L	1,50

Identificados todos os fluxos de entrada de energia que incidiram dentro do sistema na fase de colheita, conclui-se que o valor total de energia foi de 24.318,11 MJ ha⁻¹ para o primeiro ano, conforme Tabela 14.

Tabela 14 – Índices energéticos dos insumos aplicados

Insumos	Unidade	Quantidade (Unidade ha⁻¹)
Mão-de-obra	h	12,93
Consumo	L	360,84
Depreciação	kg	9,82
Fertilizante 20 - 00 - 20	kg	550,00
Herbicidas IMAZAPIC	kg	0,15
Herbicidas ISOXAFLUTOLE	kg	0,14
Herbicidas 2,4 D	kg	0,60
Catção química carregadores	L	1,50

3.3.4 Cálculo de Balanço Energético

Para se chegar ao valor correspondente a geração energética do sistema, foi determinada a produção agrícola de cada ciclo agrícola e qual o gasto energético necessário.

3.3.4.1 Cálculo Produção Agrícola Energética

O cálculo de produção energética foi efetuado pela identificação de cada produção em $t\ ha^{-1}$ convertida em MJ.

Para determinar o qual o valor energético que resultou o sistema foi efetuada a conversão da ATR em litros de Etanol foi efetuada e, depois determinado esse valor em litros de Etanol, conforme fórmula 13.

$$L = X \cdot ATR \quad (16)$$

Em que :

L = Etanol (L)

$X = 1,05$ (conversão da ATR em litros de etanol).

Sendo o valor o valor em litro de etanol deve ser convertido em MJ

$$\text{Produção} = L \cdot Y \quad (17)$$

Em que:

L = Total de Etanol (L)

$Y = 23,70\ MJ\ L^{-1}$ (referente ao valor energético de 1 litro de etanol).

3.3.4.2 Produção Agrícola

A produção agrícola foi determinada em produção da cana-de-açúcar por $t\ ha^{-1}$. e sua efetiva conversão em ATR (Açúcar Total Recuperável), conforme Tabela 15.

Tabela 15 - Dados de produtividade

Ciclo Agrícola	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)	ATR ($t\ ha^{-1}$)
1º Corte	122,00	17,90
2º Corte	97,00	14,25
3º Corte	87,00	12,59
4º Corte	77,00	12,06
5º Corte	67,00	12,29
Média	90,00	69,09

3.3.5 Análise de fluxo energético do eucalipto

Para a determinação da energia líquida do sistema, foram utilizados os estudos realizados na área por Romanelli (2007), que avaliou o sistema de produção de eucaliptos. O resultado obtido foi 2.120,70 GJ ha⁻¹ de energia líquida resultante do processo de 7 anos de produção de Eucalipto. Considerou-se o mesmo valor como referência para as análises realizadas. Para tanto, Romanelli desenvolveu o algoritmo (Figura 5) que identifica as entradas de energia, via mão de obra empregada, operações mecanizadas e os respectivos dados sobre máquinas e implementos e os insumos recomendados para o desenvolvimento do cultivo (Tabela 16).

Figura 6 – Algoritmo de entradas de energia em desenvolvimento de cultivo

Fonte: Romanelli (2007)

3.3.5.1 Determinação de energia de entrada

Utilizando como parâmetros os fluxos energéticos correspondentes à mão de obra empregada, depreciação do maquinário, consumo operacional e os insumos aplicados no cultivo, determinou-se a energia de entrada por meio da fórmula:

$$EE = \sum \text{Insumo}_i * \text{Ind}_i \quad (18)$$

Sendo:

EE = energia de entrada (MJ ha^{-1});

Insumo_i = quantidade por hectare do i-ésimo insumo utilizado na implantação e manejo da floresta (kg ha^{-1} , L ha^{-1} , unidades ha^{-1});

Ind_i = conteúdo energético do i-ésimo insumo (MJ kg^{-1} , MJ L^{-1} , MJ unidade^{-1}).

Os valores dos índices de conteúdo energético dos respectivos insumos utilizados estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Fluxo de material na produção de eucalipto

Insumos	Unidade	Quantidade (Unidade ha^{-1})
Combustível	h	529,20
Maquinário	L	14,80
Mão de Obra	kg	231,40
Fertilizante I	kg	260,00
Fertilizante II	kg	400,00
Formicida	kg	1,00
Fertilizante III	kg	150,00
Lubrificante	L	22,80
Herbicida	L	7,60
Mudas	unidade	922,50
Água	kg	5.556,00
Calcário	kg	1.000,00

Fonte: Romanelli (2007)

3.3.5.2 Determinação de energia de saída

Para a determinação da energia de saída foram utilizados os dados da colheita onde foi efetuada a conversão da biomassa colhida resultando em um valor de 2.156.962,50 MJ ha⁻¹ (2.157,00 GJ ha⁻¹), para um gasto energético 36.234,50 MJ ha⁻¹ o que confere um resultado positivo de 2.120,00 GJ ha⁻¹ (ROMANELLI, 2007).

3.3.6 Análise do fluxo energético da floresta

Dada as características da área de floresta, não foi possível determinar a energia de entrada no sistema, para o cálculo de energia de saída baseou-se nas informações provenientes de inventário florestal, onde foram identificadas cerca de 95 espécies arbóreas, pertencentes à 36 famílias botânicas diferentes, em um total de 150 indivíduos amostrados em parcela de 10 m x 40 m.

A variação média da altura das árvores é de 8 a 12 metros, tendo sido identificadas árvores de até 20 m de altura. De acordo com o relatório, cerca de 53% das amostras da área possuem diâmetro de altura do peito (DAP), maior que 45 cm, 28% estão na faixa de 45 cm a 20 cm de DAP e 19% possuem DAP de 20 cm a 10 cm. Os indivíduos com as medidas de DAP inferiores a 10 cm não foram considerados no levantamento. No total das parcelas estudadas a média de ocupação que atendeu estas especificações foi de 150 indivíduos por hectare. Realizada a etapa de quantificação da amostra, foi estimado o volume de madeira por área por meio da fórmula:

$$\text{Volume} = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (19)$$

Em que:

$\pi = 3,141592$

$h = 15$ m (altura média das árvores levantadas).

Para a estimativa do poder calor, foi utilizado base de 5.000 Kcal.

3.3.7 Análise do balanço de energia do ganho líquido de energia

A fim de complementar as análises energéticas das áreas de estudo foram calculados a razão da energia disponibilizada pela demanda, procurando determinar o ganho absoluto dos sistemas (ROMANELLI, 2007), sendo calculado pela fórmula:

$$EROI = \frac{(ES - EE)}{EE} \quad (20)$$

Sendo que ES é a energia de entrada incidente no sistema e EE a energia de saída.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises de cada cultura, considerando as descrições de cada unidade de produção agrícola e segundo os respectivos balanços energéticos, serão abordadas nesta etapa.

4.1 Análise do balanço energético antrópico

A utilização da análise energética como metodologia para uma interpretação do comportamento de cultivos mostrou-se viável quanto à aplicação em áreas extensas, além de possibilitar a comparação entre diferentes sistemas agrícolas.

4.1.1 Balanço energético da cana-de-açúcar

O estudo de balanço energético da área indica uma entrada de energia referente às ações antrópicas (Tabela 17).

Tabela 17 - Demanda de energia em insumos na cana-de-açúcar

Insumos	Unidade	Fluxo Massa (Unidade ha ⁻¹)	Índice energético (MJ unid ⁻¹)	Fluxo de energia (MJ ha ⁻¹)
Mão-de-obra	h	12,93	2,20	28,45
Consumo	L	360,84	38,60	13928,24
Depreciação	kg	9,82	68,90	676,86
Fertilizante 20 - 00 - 20	kg	550	16,14	8877,00
Herbicidas IMAZAPIC	kg	0,15	254,57	38,19
Herbicidas ISOXAFLUTOLE	kg	0,14	254,57	35,64
Herbicidas 2,4 D	kg	0,60	87,40	52,44
Catção química carreadores	L	1,50	454,20	681,30
Energia total de Entrada em MJ ⁻¹				24.318,11

Para se determinar a energia inserida no sistema referente às operações agrícolas são considerados o emprego de mão-de-obra (Tabela 18) e os insumos incidentes sobre o cultivo (Tabela 19).

Tabela 18 - Demanda de energia no plantio da cana-de-açúcar

Fluxo de materiais	Unidade	Unidade ha⁻¹	Índice energético (MJ unid-1)	Fluxo de energia (MJ ha⁻¹)
Mão-de-obra	h	11,35	2,20	24,97
Consumo	L	73,52	38,60	2.838,03
Depreciação	kg	7,26	68,90	500,44
Fertilizante 05 - 25 - 25	kg	500,00	8,52	4.260,00
Calcário dolomítico	kg	2.500,00	1,67	4.175,00
Fosfatagem	kg	150,00	9,79	1.468,50
Gesso agrícola	kg	1.500,00	1,67	2.505,00
Herbicidas thebutiuron	L	2,00	254,57	509,14
Herbicida AMETRINA	L	3,00	274,62	823,86
Mudas	un	16,00	210,00	3.360,00
Herbicida 2,4D	L	0,60	87,04	52,22
Energia total de entrada				20.517,17

Tabela 19 - Demanda de energia na produção da cana-de-açúcar no primeiro corte

Fluxo de materiais	Unidade	Unidade ha⁻¹	Índice energético (MJ unid-1)	Fluxo de energia (MJ ha⁻¹)
Mão-de-obra	h	12,93	2,20	28,45
Consumo	L	360,84	38,60	13928,24
Depreciação	kg	9,82	68,90	676,86
Fertilizante 20-00-20	kg	550,00	16,14	8877,00
Herbicidas IMAZAPIC	L	0,15	254,57	38,19
Herbicida SOXAFLUTOLE	L	0,14	254,57	35,64
Inseticida 2,4 D	kg	0,60	87,40	52,44
Catção química carreadores	L	1,50	454,2	681,30
Energia total de entrada				24.318,11

Para possibilitar a comparação entre os sistemas agrícolas, os resultados estão apresentados em MJ ha⁻¹ conforme as fases do plantio e as respectivas energias incidentes, conforme Tabela 10.

4.1.1.1 Entradas de energia para o ciclo produtivo

Por meio da identificação dos principais fluxos energéticos que incidiram sobre o sistema durante 5 anos, foram obtidos valores de energia de entrada por ciclo agrícola (Tabela 20).

Tabela 20 - Demanda de energia no ciclo de produção da cana-de-açúcar

Fase Agrícola	Energia de Entrada (GJ ha ⁻¹)
Plantio	17,17
1º Corte	24,32
2º Corte	26,59
3º Corte	22,22
4º Corte	21,42
5º Corte	16,05
Total	127,77

4.1.1.2 Produção energética (energia de saída)

A produção energética de saída do sistema da cana-de-açúcar (Tabela 21) foi determinada em t ha⁻¹, convertida em ATR (açúcar total recuperável) e em GJ ha⁻¹.

Tabela 21 - Produtividade de biomassa, açúcar e energia de saída da cana-de-açúcar

Ciclo Agrícola	Produtividade (t ha ⁻¹)	ATR (t ha ⁻¹)	Produção Energia (GJ ha ⁻¹)
1º Corte	122,00	17,90	432,37
2º Corte	97,00	14,25	344,26
3º Corte	87,00	12,59	304,21
4º Corte	77,00	12,06	291,46
5º Corte	67,00	12,29	296,85
Total	450,00	69,09	1669,85

Obs: Realizadas as conversões de ATR para litros de etanol e deste para MJ ha⁻¹

4.1.1.3 Indicadores de energia

O gasto energético do sistema foi de 127,77 GJ ha⁻¹, apresentando um superávit de 1.541,38 GJ ha⁻¹ como saldo final.

Tabela 22 - Indicadores de eficiência energética da produção de cana-de-açúcar

Ciclo Agrícola	Energia de Entrada (GJ ha⁻¹)	Energia de Saída (GJ ha⁻¹)	Balanço Energético (GJ ha⁻¹)
Plantio	17,17	0	-17,17
1º Corte	24,32	432,37	408,05
2º Corte	26,59	344,26	317,67
3º Corte	22,22	304,21	281,99
4º Corte	21,42	291,46	270,04
5º Corte	16,05	296,85	280,80
Total	127,77	1.669,15	1.541,38

Para as áreas selecionadas de cana-de-açúcar no estado de São Paulo e conforme sistemas de produção adotados, o estudo de balanço energético por meio de fluxos energéticos considerou as entradas de energia incidentes no sistema, como combustíveis, insumos, mão-de-obra e transporte da produção.

Nessa condição, o custo energético para de cana-de-açúcar foi de 21,82 GJ ha⁻¹ em média, tendo sido a maior demanda de energia referente ao consumo de combustíveis fósseis: 11,72 GJ ha⁻¹, valor correspondente à 58% do gasto energético total. O segundo maior gasto energético foram os insumos com 9,00 GJ ha⁻¹, correspondentes a 37% do total. Salla e Cabello (2010) efetuaram estudos comparativos entre cultivos de cana-de-açúcar, milho e mandioca (cultivadas com o objetivo de geração de energia e não alimentação), chegando a um valor médio de 14,38 GJ ha⁻¹, onde o emprego de insumos representou 7,24 GJ ha⁻¹, valor próximo ao resultado encontrado no presente trabalho. Esses valores também são próximos aos resultados de outro estudo de Salla et al. (2009), que determinaram 14,64 GJ ha⁻¹, onde os insumos são cerca de 77% de todo gasto energético do cultivo e o uso de máquinas agrícolas respondem por cerca de 3,53 GJ ha⁻¹.

Para Khan e Fox (1984), o valor encontrado foi de 16,17 ha⁻¹ em área de cana-de-açúcar irrigada, utilizando 37% de consumo energético em insumos, compatíveis aos dados do estudo corrente, embora o gasto com depreciação de máquinas

agrícolas e consumo de combustíveis tenham sido de 34,40 GJ ha⁻¹, maior que os 12,41 GJ ha⁻¹, encontrados neste trabalho. Mais uma vez a diferença de valores pode estar relacionada aos diferentes tratos e maquinário agrícola utilizados.

4.1.2 Balanço energético do eucalipto

Romanelli (2007) determinou uma eficiência de 2.120,70 GJ ha⁻¹ para o cultivo de eucalipto, valor próximo ao obtido por Oliveira Junior (2005), em que o valor produzido gerado foi equivalente a 62 vezes o valor investido, considerando os principais gastos o transporte rodoviário e a colheita.

Os estudos de energia incidente no cultivo de eucalipto indicam a dependência direta de fontes de energia fóssil. Bueno e Quintana (2000) determinaram em 83,41% as fontes energéticas de origem industrial e em 16,54% a energia de fonte fóssil direta necessárias para produzir 1 ha de floresta de eucalipto, cujas operações de preparo de solo tiveram gasto de 3,31 GJ ha⁻¹.

Analisando o consumo de combustível e insumos como energia fóssil direta, os resultados obtidos por Romanelli (2007) indicam que os mesmos correspondem a cerca de 60% do fluxo energético, sendo que 0,2% representam uso de máquinas, classificadas aqui como fontes de energia oriundas do grupo industrial.

4.1.3 Análise energética florestal pelo potencial calorífico da floresta

Dada a falta de informações sobre as fontes energéticas incidentes na área de floresta, foram apenas estimados os valores energéticos da floresta correspondentes à conversão do seu valor calorífico em GJ ha⁻¹ o que resultou no total energético de 695,00 GJ ha⁻¹.

4.1.4 Análise da energia disponibilizada/demanda dos sistemas.

A fim de completar a análise energética dos sistemas foi calculado o EROI da cultura de cana-de-açúcar, utilizando a equação 20. O resultado final aponta um sistema com um ganho energético por área cultivada de 281,40 MJ ha⁻¹, com um

índice de energia incorporada de 0,93. Este resultado se comparado com o trabalho de obtido por Romanelli (2007), indica que a energia incorporada da cana-de-açúcar foi 5% menor se para a área de eucalipto que apresentou um EROI de 0,98. Não foram calculados o balanço energético da área de floresta uma vez que não foi possível calcular os fluxos energéticos incidentes no sistema e tão pouco a energia de saída, uma vez que não foi efetuada retirada de biomassa da vegetação.

4.2 Análise por balanço energético radiométrico

A fim de obter informações mais confiáveis a respeito do comportamento de alguns parâmetros radiométricos específicos para as áreas de estudo, foram coletadas várias imagens em diferentes períodos de safra e condições climáticas.

Os dados coletados em 5 anos consecutivos de cultivo para cana-de-açúcar apresentam um valor médio de $424,65 \text{ W m}^{-2}$, com variações entre o máximo de $460,20 \text{ W m}^{-2}$ para o mês de Outubro e o mínimo de $387,00 \text{ W m}^{-2}$ para os meses de Julho a Setembro (média entre os anos de 2005 e 2010). Os valores médios variam em torno de 3% dos valores obtidos por Gomes et al. (2009), que chegou a valores entre $448,00 \text{ W m}^{-2}$ a $453,30 \text{ W m}^{-2}$. Comparados aos valores obtidos na área de estudo, verifica-se que são compatíveis com os resultados do método de balanço energético radiométrico (BASTIAANSEN, 2000), conforme Tabela A.1 (Anexo A).

Os valores de Onda Longa Emitida para as áreas de eucalipto apontam um valor médio de $411,00 \text{ W m}^{-2}$ com valores máximos de $440,00 \text{ W m}^{-2}$ no mês de Maio e valor mínimo de $371,44 \text{ W m}^{-2}$ no mês de Agosto, Tabela B.1 (Anexo B). Este comportamento radiométrico pode ser explicado pela diferença de dosséis da vegetação que acarreta consequentemente, um aumento do albedo e uma menor temperatura de superfície (CORTEZ et al., 2009).

O valor médio das áreas de floresta é de $409,64 \text{ W m}^{-2}$, com $454,29 \text{ W m}^{-2}$ como valor máximo e $318,35 \text{ W m}^{-2}$ como valor mínimo. Os valores bem próximos ao das áreas de florestas podem ser explicados pela característica da vegetação, que possui árvores com altura superior a 10m de e com um dossel fechado, o que ajuda a manter uma menor temperatura (Tabela C.1). Segundo Furlan et al. (2011), valores de onda longa emitida acima de $470,00 \text{ W m}^{-2}$ são encontrados em áreas urbanas ou fortemente antropizadas.

Analisando-se os dados obtidos no estudo realizado e outras referências sobre o assunto, pode-se verificar que as diversas formas de energias incidentes sobre os cultivos não alteraram a capacidade de degradação da energia solar, além de indicar que quanto mais caminhos a energia encontra para se dissipar, maior é a sua eficiência em degradar a energia.

Na busca por elementos indicativos sobre a intensificação de entrada energética e a relação com a alteração da capacidade de degradação energética, foram comparados os mesmos sistemas biológicos, desenvolvidos com técnicas agrícolas diferentes das estudadas.

Dada a falta de informações referente à Onda Longa Emitida e Onda Curta Incidente em aplicações compatíveis ao estudo, foram utilizados como dados complementares as análises, valores referentes ao saldo de radiação, os quais contemplam os dados referente a energia repartida para o aquecimento do ar, aquecimento do solo e processos evaporativos (ARRAES, 2010).

Para a verificação do efeito da incidência de energia antrópica no sistema produtivo agrícola, compararam-se os valores referentes ao saldo de radiação na cultura do eucalipto, cana-de-açúcar e floresta nativa natural.

Os resultados obtidos nos cálculos de saldo de radiação confirmam a avaliação obtida por intermédio do balanço radiométrico na comparação entre culturas e sua eficiência energética. Conforme as referências, os resultados de saldo de radiação para os alvos estudados estão sempre próximos aos encontrados nesse estudo, independentemente do manejo agrícola a que foram submetidos.

Este comportamento pode ser indicativo de que as diferentes entradas de energia antrópica não alteram significativamente os balanços radiométricos, sendo estes mais influenciados pelo relevo, período das amostras e localização próxima à corpos d'água. Apesar de a latitude poder ser um componente que influencie os resultados, as áreas alvo estão dentro da mesma faixa, ainda que em latitudes variadas.

4.3 Incidência de energia antrópica e a alteração da degradação energética

Para estabelecer a relação efetiva entre a influência da incidência de energia antrópica sobre a degradação energética radiométrica, foram conflitados os resultados dos estudos comparativos entre o Balanço Energético por Fluxo de Massa e o Balanço Energético por Fluxo Radiométrico das culturas analisadas.

Para as culturas de cana-de-açúcar e eucalipto esperava-se observar se a mudança de comportamento do cultivo possui relação direta com a degradação da energia. Assim, foram analisados os dados da produtividade da biomassa ($t\ ha^{-1}$), eficiência energética (GJ), saldo de radiação ($W\ m^{-2}$), degradação energética radiométrica (%) e o NDVI.

Foram analisados os cultivos ano a ano, de forma a ser possível detectar e analisar os fatores que mais interferiram nos resultados obtidos e as variações em relação ao período. A Tabela apresenta os resultados referentes às colheitas por ano de cultivo, uma vez que na fase de plantio não puderam ser computados os dados referentes à saída energética.

4.3.1 Análise do cultivo de cana-de-açúcar

A cultura de cana-de-açúcar foi analisada por 5 anos consecutivos, por meio de imagens de satélites em períodos diversos, cujos resultados foram compilados na Tabela 23.

Tabela 23 - Dados de produtividade e eficiência energética por ciclo de produção

Ano Cultivo	Fase Cultivo	Produção $t\ ha^{-1}$	Eficiência Energética $GJ\ ha^{-1}$	Degradação Energética %	RN $W\ m^{-2}$	NDVI	Temperatura $^{\circ}C$
2006	1° Corte	122,00	408,05	55,00	418,10	0,31	24,89
2007	2° Corte	97,00	317,67	60,00	463,23	0,41	20,00
2008	3° Corte	87,00	281,99	66,00	383,23	0,32	21,00
2009	4° Corte	77,00	270,04	83,00	540,59	0,36	24,79
2010	5° Corte	67,00	280,80	63,00	515,27	0,28	23,31

O cultivo de cana-de-açúcar apresentou resultados médios de saldo de 458,70 $W\ m^{-2}$ (Figura G.1), com valores bem próximos aos obtidos por Rudorff et al. (2007), que foram de 725,00 $W\ m^{-2}$ a 445,00 $W\ m^{-2}$, para os quais os pesquisadores

observaram que o algoritmo SEBAL superestimou os valores em 4,8%. Nos estudos de Gomes et al. (2009) os valores variaram entre $570,90 \text{ W m}^{-2}$ e $309,90 \text{ W m}^{-2}$, justificados pelos pesquisadores como sendo produto da sazonalidade das imagens analisadas.

O primeiro corte apresentou produtividade de $122,00 \text{ t ha}^{-1}$, a melhor de todo o ciclo estudado. Esse comportamento é esperado uma vez que a cana-de-açúcar sofre uma perda gradativa de sua capacidade produtiva, conforme os estágios de desenvolvimento da cultura (PICOLI, 2007).

Segundo dados do Agritempo (2006), a temperatura média para o ano de 2006 foi de $24,89 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e para o mês de abril, período da coleta da imagem de satélite utilizada, a temperatura obtida foi de $24,05 \text{ }^{\circ}\text{C}$, com incidência de chuva de $54,60 \text{ mm}$. O NDVI detectado foi de $0,553$, indicando grande volume de biomassa produzida para o período (PONTES et al., 2005). O saldo de radiação para o mesmo período foi de $444,65 \text{ W m}^{-2}$, o que indica compatibilidade com os valores médios apresentados.

A segunda leitura foi efetuada no mês de setembro, quando a temperatura obtida na imagem foi de $18,23 \text{ }^{\circ}\text{C}$, com índice pluviométrico médio de $69,50 \text{ mm}$ para o período (CIIAGRO).

O saldo de radiação teve um decréscimo, apresentando o valor de $386,82 \text{ W m}^{-2}$, abaixo dos valores encontrados nas referências pesquisadas. Este comportamento pode ser resultado da baixa temperatura registrada no dia da passagem do satélite, pois o componente (RN) é influenciado diretamente pela temperatura do ambiente. O valor NDVI foi $0,198$ compatível aos resultados obtidos por Pontes et al. (2005), relacionada ao período de colheita da área. O imageamento efetuado em novembro (Figura 8) obteve a temperatura de $32,40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e pluviosidade de $35,40 \text{ mm}$ (CIIAGRO, 2006).

Figura 7 – Imagem da área cana no mês de novembro de 2006

O saldo de radiação extraído das imagens foi de $368,28 \text{ W m}^{-2}$, conforme a média obtida em referências. O valor de NDVI foi de 0,204 próximo ao encontrado na leitura anterior (mês de setembro), indicando pouca mudança no cenário de plantio. A alteração da taxa de ocupação da cultura influenciou os valores extraídos da imagem, baseados na variabilidade espacial média da área de cultivo, resultando em valores menores do NDVI. Considerando os dados relacionados ao mesmo período, a degradação energética obtida por meio do BE por fluxo de massa (compilações dos dados de entrada e saída de energia do plantio conforme Tabela 23). Foi obtido pela conversão da quantidade de ATR do período, que foi de $17.033,64 \text{ t ha}^{-1}$, valor que convertido em MJ, resultou em uma energia de saída de $432,37 \text{ GJ ha}^{-1}$ e em um ganho de $408,05 \text{ GJ ha}^{-1}$.

Com temperatura média anual de $22,60 \text{ }^{\circ}\text{C}$, os valores de $\text{RN} = 418,10 \text{ W m}^{-2}$, de $\text{NDVI} = 0,310$ atendem às expectativas para a cultura, cujos cálculos do índice de degradação energética extraído com base na onda longa emitida e onda curta incidente, indica 0,55% de eficiência na degradação energética do sistema.

No ano de 2007 a produtividade agrícola da área foi de $97,00 \text{ t ha}^{-1}$, apresentando queda de 20,5% em relação ao ano anterior, coerentes com os resultados obtidos por Perecin et al. (2009).

O primeiro imageamento foi efetuado no mês de março (Figura 8) e foram obtidos valores 0,535 para o NDVI, indicando densa cobertura foliar do cultivo

(Figura 9), com o valor de RN de $512,19 \text{ W m}^{-2}$, com uma temperatura de $26,11 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e índice pluviométrico de 203,10 mm (CIIAGRO, 2007).

Figura 8 – Imagem da área cana no mês de março de 2007

Os valores encontrados estão coerentes aos encontrados em outras referências sobre o tema. Apesar de apresentar uma produtividade menor, os valores de NDVI e RN foram os melhores obtidos na área de estudo, indicando influência do aumento de temperatura e quantidade de chuvas. A segunda leitura ocorreu no mês de julho (Figura 9), cujos valores obtidos foram: NDVI de 0,397 e RN 417,58. A temperatura média do mês foi de $17,05 \text{ }^{\circ}\text{C}$, com índice pluviométrico de 177,5 mm. Como em outras tomadas, a variação de do NDVI, pode estar sendo influenciado pelas áreas sem vegetação. A última imagem da série foi tomada no mês de setembro (Figura 10) e apresentou valor de saldo de radiação 459,01 próximo aos valores anteriores, apesar da menor incidência de chuva: 19,70 mm (CIIAGRO, 2007).

Figura 9 – Imagem da área cana no mês de julho de 2007

Figura 10 – Imagem da área cana no mês de setembro de 2007

O valor do NDVI = 0,287 apresentou uma variação em relação ao mês de julho, o que pode ser explicado pela menor incidência de chuva no período e pela colheita da cana-de-açúcar na área.

A temperatura com média de 16,84 °C, quase não se alterou se comparada ao mês de julho, o que reforça a teoria de que a variação espacial da área e a falta de chuvas sejam os principais fatores que alteram a cobertura vegetal.

A eficiência energética calculada para o período foi de 317,67 GJ ha⁻¹, com uma produção energética de 344,26 GJ ha⁻¹, correspondente à uma produtividade de ATR de 13.259,90 Kg ha⁻¹. O gasto energético foi de 26,59 GJ ha⁻¹, 9% menor se comparado ao período anterior, sendo a única diferença no manejo agrícola a aplicação de 2,30 t ha⁻¹ de calcário dolomítico e 1,00 t ha⁻¹ de gesso agrícola no ano de 2007.

Os estudos de balanço radiométrico apontam uma eficiência energética para o sistema de 60%, com um valor médio de NDVI 0,406 e saldo de radiação de 463,23 W m⁻², indicando que nesse período, a degradação energética do sistema foi melhor do que no anterior, não havendo correspondência com o comportamento de queda de rendimento do sistema.

O período de 2008, foi o correspondente ao 3º corte do cultivo e apresentou uma produtividade de 87,00 t ha⁻¹, uma queda de 28,69% em relação ao primeiro corte e 10,31% menor que o segundo corte, seguindo o comportamento de queda.

A eficiência energética foi de 281,99 GJ ha⁻¹, refletindo diretamente na queda da produtividade da biomassa (t ha⁻¹). A taxa de ATR para o período foi de 12.407,07 t ha⁻¹, 6,43% menor que a anterior.

O gasto energético foi de 22,22 GJ ha⁻¹, menor que no período de 2007, quando foi necessária a adoção de calcário dolomítico (1 t ha⁻¹) e gesso agrícola (1 t ha⁻¹), para uma produção de 304,21 GJ ha⁻¹.

As leituras radiométricas foram realizadas nos meses de abril (Figura 11), julho e dezembro. O valor do saldo de radiação para o mês de abril foi de 440,00 W m⁻². O NDVI para este período foi de 0,306, inferior ao obtido no mesmo período, na primeira safra, em 2006 (NDVI de 0,533). A temperatura obtida pelos cálculos radiométricos foi de 23,68 °C, bem próxima à obtida para o mesmo mês da primeira safra (24,05 °C). A incidência de chuvas apresentou um valor médio 78,90 mm (CIIAGRO, 2008) no mês do 3º corte e de 54,60 mm (CIIAGRO, 2008) no mês do primeiro corte.

Figura 11 – Imagem da área cana no mês de abril de 2008

O segundo imageamento é do mês de julho e resultou em um NDVI de 0,331, conforme valores encontrados em outros trabalhos, embora se comparado ao ano anterior, o cultivo apresenta um resultado 16,62% menor. A incidência pluviométrica foi de 14,60 mm (CIIAGRO, 2008), inferior ao mesmo período no ano anterior (2007) que foi de 177,50 mm (CIIAGRO, 2008) para o período de julho.

A terceira passagem foi efetuada no mês de dezembro (Figura 13) e o NDVI apresentado, de 0,332 quase não teve alteração em relação à última leitura no mês de julho, quando os valores de NDVI foram de 0,331. Este comportamento contraria os resultados obtidos anteriormente, em que a presença de áreas vazias interferiu no resultado do NDVI.

Em relação às variáveis ambientais que poderiam alterar os resultados das análises, a temperatura foi a que apresentou uma variação mais significativa, pois se comparadas às leituras do mês de julho de 2008, a temperatura média variou de 14,63°C para 24,69 °C. Para os valores de RN a variação foi de 13%, com 391,00 W m⁻² em dezembro e 450,00 W m⁻² na leitura efetuada no mês de julho. Este comportamento também contraria o os resultados anteriores e as referências pesquisadas, segundo as quais se espera valores de RN mais altos para temperaturas mais altas.

Figura 12 – Imagem da área cana no mês de dezembro de 2008

A degradação energética do sistema foi de 66%, indicando que este período foi o mais eficiente em relação aos primeiros anos. Os cálculos de balanço energético por fluxo de massa reforçam a tendência de queda na eficiência energética do plantio e este comportamento é justificado pela menor produtividade $87,00 \text{ t ha}^{-1}$, e um menor rendimento de ATR por hectare, que foi de $12.407,07 \text{ kg ha}^{-1}$. Nota-se que o envelhecimento do cultivo está refletindo nos valores de NDVI, pois a amostra da média geral das imagens resultou em um valor de NDVI de 0,323 e saldo de radiação de $383,23 \text{ W m}^{-2}$.

Para os cálculos radiométricos referentes ao quarto ano de cultivo da área, foram utilizadas imagens dos meses de abril, agosto e outubro. A produtividade foi de $77,00 \text{ t ha}^{-1}$, 11% menor que a do ano anterior. O manejo agrícola utilizou os mesmos parâmetros de produção, gerando um gasto energético de $21,42 \text{ GJ ha}^{-1}$. O NDVI para o mês imageado de abril (Figura 13) foi de 0,419 indicando o melhor índice de biomassa para todo o ano, mesmo apresentando áreas de solo sem vegetação (Figura 14) e com incidência de chuva de 33,70 mm no período. A temperatura média obtida por imagens de satélite foi de $23,38 \text{ }^{\circ}\text{C}$, com RN de $381,00 \text{ W m}^{-2}$ (dentro da margem esperada).

Figura 13 – Imagem da área cana no mês de abril de 2009

A segunda leitura de NDVI realizada no mês de agosto foi de 0,299 o que poderia ser indicativo de perda na qualidade da vegetação, (Figura 14). O saldo de radiação medido para o período foi de $818,20 \text{ W m}^{-2}$, para um valor de temperatura de $21,39 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (extraído da imagem de satélite), com pluviosidade de 62,60 mm.

Figura 14 – Imagem da área cana no mês de agosto de 2009

Em comparação aos valores levantados no período anterior, o saldo de radiação apresentou um aumento de valor, apesar de ter tido uma temperatura média menor. A última imagem é do mês de outubro (Figura 15), com valores de NDVI de 0,364, valor superior ao da imagem de agosto. Outubro teve um índice pluviométrico de 172,60 mm, valor 63,74% maior que o mês de agosto e temperatura média de 29,31 °C (extraída na imagem de satélite).

Figura 15 – Imagem da área cana no mês de outubro de 2009

O saldo de radiação foi de $776,55 \text{ W m}^{-2}$, compatível à média dos estudos de referência, mesmo sofrendo um aumento da temperatura. O índice de degradação energética, extraído por BE radiométrico foi de 0,83%, indicando este como o período de melhor desempenho energético, sendo este ano o período onde o cultivo teve sua maior eficiência energética, comparado aos anos anteriores. Os valores do balanço energético radiométrico não acompanharam a tendência de queda na eficiência energética do sistema (Tabela 23).

Com uma produção de $291,46 \text{ MJ ha}^{-1}$ (oriundos de uma ATR de $11.171,93 \text{ kg ha}^{-1}$) e um gasto energético de $21,42 \text{ GJ ha}^{-1}$, o sistema contabilizou um total de $270,04 \text{ GJ ha}^{-1}$, menor valor entre todos os períodos estudados. Esta contabilidade inferior é o resultado da menor produtividade de biomassa e ATR por hectare, comportamento já esperado para o cultivo segundo referências.

Os resultados apresentados divergem da teoria de que a melhor conversão da eficiência em degradar energia resulta em sistemas mais estáveis e com maior ganho de biomassa, pois mesmo com menor produtividade de biomassa por hectare, comparado aos outros anos de cultivo, o BE radiométrico indica que este ano foi melhor que os anteriores. O resultado final do BE radiométrico, computada a média de todas as imagens para o período de 2009, foi um saldo de radiação $0,364 \text{ W m}^{-2}$ e de um NDVI médio de 540,59.

O último ano de cultivo analisado, foi o correspondente ao 5º corte da cana-de-açúcar e apresentou uma produtividade de 67 t ha^{-1} , tendo sido a menor produção para o período estudado (5 anos). Com uma queda de 45,08% na produtividade, o gasto energético para este ano foi de $16,05 \text{ GJ ha}^{-1}$, que comparado ao *input* energético recebido foi 33,96% menor.

A produção energética foi de $296,85 \text{ GJ ha}^{-1}$, correspondentes à uma produção de 9.437,17 ATRs, sendo que o sistema teve um superávit foi de $280,80 \text{ GJ ha}^{-1}$. A temperatura média obtida por intermédio das imagens de satélite foi de $23,31 \text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo que o NDVI foi de 0,277 e o RN de $515,27 \text{ W m}^{-2}$.

Para o mês de abril (Figura 16) o valor de NDVI foi de 0,407, com RN de $378,20 \text{ W m}^{-2}$ e incidência de chuva de 51,20 mm. Os valores obtidos nesta amostra são próximos aos valores de NDVI gerados nos anos antecedentes (de 0,533 a 0,419). Os valores de saldo de radiação que variaram de 381,00 a $444,65 \text{ W m}^{-2}$, para os meses de abril de 2006, 2008 e 2009, acompanham a tendência de perda de produtividade agrícola do cultivo.

Os valores de NDVI na segunda amostra do mês de agosto (Figura 17), foi de 0,172 valor abaixo das medidas para o mesmo mês do ano anterior, com o valor do saldo de radiação de $441,77 \text{ W m}^{-2}$. O aumento dos valores de RN também reflete a maior temperatura medida na imagem, que foi de $28,85 \text{ }^{\circ}\text{C}$, uma vez que os valores de NDVI foram inferiores comparados a medidas anteriores.

A última amostra é referente ao mês de novembro, quando o NDVI foi de 0,251, com um saldo de radiação de $725,85 \text{ W m}^{-2}$. A temperatura medida na imagem foi de $23,26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e considerando que não houve mudanças no manejo agrícola, o aumento deste valor pode estar relacionado a outros fatores não abordados nesse trabalho, como pressão atmosférica, velocidade do vento, incidência de luz solar, etc.

Figura 16 – Imagem da área cana no mês de abril de 2010

Figura 17 – Imagem da área cana no mês de agosto de 2010

A média final dos valores de NDVI para os três períodos estudados foi de 0,277, que comparado às outras amostras, do 1º, 2º, 3º e 4º anos, demonstra a perda da qualidade da biomassa vegetal, acompanhando os resultados de declínio da produtividade. O valor médio de saldo de radiação para este período foi de $515,27 \text{ W m}^{-2}$, de acordo com os dados de referências pesquisadas, mas não acompanha a tendência de perda da produtividade agrícola. Este comportamento também não teve relação com o valor calculado para a degradação energética, que foi de 63% de eficiência, mesmo com os resultados inferiores de produtividade agrícola e energética.

A análise dos dados da produtividade agrícola, dos cálculos de eficiência energética (proveniente do fluxo de massa) e dos resultados de eficiência energética (via balanço energético radiométrico), demonstrou que o aumento da energia dentro do sistema, via alteração antrópica, não alterou a eficiência da degradação energética do sistema, sendo essa mais sensível a alterações ambientais.

4.3.2 Análise do cultivo de eucalipto

Devido às características peculiares do manejo florestal, a intensidade da atividade antrópica se concentra principalmente em dois períodos: plantio e colheita. O manejo agrícola se dá nos primeiros anos do cultivo, concentrando-se no primeiro ano (plantio) diminuindo sua intensidade ao longo do período e intensificando-se novamente no sétimo ano (colheita).

As análises da área de eucalipto serão concentradas em períodos anuais entre os anos de 2000 e 2007, em que se esperava o aumento da biomassa e conseqüentemente sua eficiência em degradar energia, sendo o processo identificável nas análises.

Por meio do NDVI, foi possível verificar o desenvolvimento da vegetação, que teve como média do período de sete anos, um valor de 0,670, resultado próximo ao encontrado por Vicens et al. (2001). O uso do saldo de radiação para a verificação da decomposição deve seguir o mesmo princípio, segundo o qual espera-se que quanto maior o ganho de biomassa, maior o saldo de radiação, componente que possui relação direta com a taxa de evapotranspiração da vegetação. A média para o ano foi de $446,45 \text{ W m}^{-2}$, dentro dos valores pesquisados por Rudorff et al. (2007).

Os valores referentes ao saldo de radiação para as áreas de eucalipto (Figura H.1) apontam um valor médio de $438,00 \text{ W m}^{-2}$ com valores máximos de $452,85 \text{ W m}^{-2}$ mínimo de $423,84 \text{ W m}^{-2}$ no mês de agosto (Tabela H.1) (Anexo H). Esse comportamento radimométrico pode ser explicado pela diferença de dosséis da vegetação, com consequente aumento do albedo e uma menor temperatura de superfície (CORTEZ et al., 2009). Em seus estudos, Gomez et al. (2009) encontraram valores de saldo de radiação para eucalipto variando entre $448,20$ e $435,30 \text{ W m}^{-2}$, coerentes aos resultados obtidos por Menezes et al. (2011), na ordem de $420,12 \text{ W m}^{-2}$ para uma área de eucalipto com idade de 7 anos, números próximos aos obtidos na área de eucalipto estudada, de $458,00 \text{ W m}^{-2}$. Lopes et al. (2011), identificaram a necessidade de estudos *in loco*, para a verificação de algumas variáveis como a cobertura vegetal do entorno dos alvos avistados, influência da vegetação morta, tipo de relevo e hora da passagem do satélite, que podem influenciar os resultados.

A primeira análise da área de estudo foi para o ano de 2000 com as imagens dos meses de abril, agosto e setembro. Realizados os cálculos para o período, foram obtidos os valores de referência da cobertura vegetal (NDVI) de 0,619 e de saldo de radiação de $446,42 \text{ W m}^{-2}$, apresentado uma eficiência em degradar a energia em torno de 0,65%, com uma temperatura de superfície de referência (oriunda das imagens de satélite) em torno de $21,29^\circ\text{C}$ e uma média de chuva de 123,03 mm (CIIAGRO, 2000).

A análise do ano de 2001 baseou-se em imagens dos meses de julho, agosto (Figura 18) e outubro cujos resultados indicam que houve um aumento no índice de cobertura vegetal de 3% (de 0,169 para 0,640 W m^{-2}) e uma variação pequena do RN de 446,42 para $450,03 \text{ W m}^{-2}$ (0,8%). Os dados quando compilados para a geração do índice de degradação energética, indicam que o ano de 2001 obteve 65% de eficiência de degradação energética e 62% de eficiência para o ano de 2002. No levantamento da temperatura média anual (extraída pelas imagens de satélites) a temperatura para o ano de 2002 foi de $18,74^\circ\text{C}$, (menor que a do ano de 2001), assim com a incidência de chuvas que foi de 113,95 mm (CIIAGRO, 2002).

Figura 18 – Imagem da área no mês de agosto de 2001

Para 2003, foram utilizadas imagens dos meses de agosto e outubro e a média anual apresentou NDVI de 0,570 e um RN de $420,00 \text{ W m}^{-2}$. O índice de área foliar apresentou um resultado inferior em comparação às outras leituras (8% em relação à 2000 e de 10,93% em relação à 2001), indicando um menor desenvolvimento que os dois períodos. O valor do saldo de radiação também apresentou uma queda nos valores, ficando 5,91% menor que o ano de 2000 e 6,68% menor que 2001, porém se comparado a eficiência na degradação energética, o ano de 2003 apresentou o melhor resultado, com 85% de eficiência, 33,34% melhor que o ano de 2000 e 23,45% melhor que o ano de 2001.

Para as análises do período de 2003, foi utilizado o valor médio de temperatura de $20,20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura próxima às encontradas para os anos de 2001 e 2000. O índice pluviométrico também se manteve próximos aos outros anos do cultivo, com uma média de 99,93 mm (IPMET, 2003), o que não justifica o aumento significativo da degradação energética para o ano de 2003.

Para as análises referentes ao ano de 2004, foram utilizadas imagens de maio, novembro e agosto, com uma média de valor de NDVI de 0,638 e RN de $451,51 \text{ W m}^{-2}$.

Em comparação ao período anterior, o valor de parâmetro de análise da cobertura vegetal é 12,72% melhor e o valor de saldo de radiação é 7,15% melhor para este mesmo período. A temperatura média é de $19,63 \text{ }^{\circ}\text{C}$ com o índice

pluviométrico de 108,78 mm (CIIAGRO). A comparação com o índice de área foliar do ano de 2003 indica um acréscimo de 14,57%, comportamento identificado com os valores de saldo de radiação que teve um aumento de 7%. A comparação da eficiência na degradação energética entre 2003 e 2004 (Figura 19) aponta um decréscimo de 42,10% (para um resultado de 57%).

Figura 19 – Imagem da área eucalipto no mês de novembro de 2004

Verificando os resultados anteriores, o valor de RN de 2003 é coerente aos resultados de 2000 e 2001, que possuem valores de 65% e 62% respectivamente. Desconsiderando a amostra do ano de 2003 (por estar acima dos resultados obtidos nos anos anteriores), os resultados tendem a indicar que o plantio apresentou pouca variação na eficiência em degradar energia. Este resultado difere do esperado, uma vez que se imaginava como resultados ganho de biomassa, com dados que tenderiam a apresentar diferenças crescentes com os anos. Ressalta-se ainda que as análises efetuadas pelo NDVI indicam que a massa foliar pouco se alterou neste período. Os resultados obtidos foram extraídos por imagens dos meses de agosto, outubro e novembro.

O NDVI foi de 0,404 para este período (o menor valor estudado por período total), refletindo a colheita de uma parte da área (Figura 21). Em comparação ao ano de 2004, o NDVI apresentou um resultado 38,13% menor para um saldo de radiação de $429,22 \text{ W m}^{-2}$. O valor menor de RN indica a queda de 4,6% neste componente,

valor próximo ao encontrados no ano de 2004 e nos demais anos da fase (2000, 2001 e 2003).

Figura 20 – Imagem da área no ano de 2005

A análise da eficiência na degradação energética aponta um resultado de 61%, próximo ao resultado de 2004, anterior ao mapeamento e próximo aos valores de 2000, 2001 (com 65% e 62% respectivamente). Este comportamento indica que a falta de vegetação não interferiu nos itens saldo de radiação e eficiência energética, ficando mais evidenciada pelo índice de área foliar.

As análises referentes ao ano de 2006 foram efetuadas com imagens dos meses de abril, maio e julho. A temperatura média obtida por intermédio das imagens de satélite foi de 19,04 °C e a intensidade de chuvas foi de 75,60 mm, 35,94% menor se comparado ao ano anterior. O valor médio de NDVI para o período é de 452,85, próximo ao valor médio do ano antecessor que foi de 429,22 (5,5% maior).

A comparação com outros anos do intervalo pesquisado, as imagens de 2006 (Figura 21) indicam um valor menor frente aos anos de 2000 a 2004, refletindo a mudança no solo. Os valores do cálculo de saldo de radiação foi de 452,85 W m⁻², próximos aos demais valores levantados na área nos anos de 2000 a 2005. O índice de degradação energética foi de 60% e se manteve dentro dos valores levantados

anteriormente (com exceção do ano de 2003), sendo que mais uma vez a movimentação do solo, não foi refletida nos valores referente ao saldo de radiação e de eficiência energética, sendo melhor representada pelo índice de vegetação.

Figura 21 – Imagem da área eucalipto no ano de 2006

Para a análise do ano de 2007 foram utilizadas imagens dos meses de julho e agosto, resultando em um NDVI médio de 0,666 para o valor da vegetação e $423,84 \text{ W m}^{-2}$ para o saldo de radiação. O valor referente ao índice de vegetação foram superiores aos dos anos de 2005 e 2006 e próximos aos valores levantados nos demais anos (2000 a 2004).

A análise das imagens de 2007 (Figura 22) demonstra que as áreas sem vegetação encontradas nos anos de 2005 e 2006, foram ocupadas por plantio, tendo a área mais uma vez sua cobertura completa. O saldo de radiação está dentro dos valores encontrados nos períodos anteriores, não demonstrando mudança, mesmo com a inclusão de novas áreas revegetadas. O índice de degradação energética calculado para o período foi de 59%, próximo aos valores dos anos de 2005 e 2006, anos em que a mudança do solo foi mais evidente. Na comparação com os demais anos a degradação energética também se manteve próxima aos demais anos (com exceção ao ano de 2003).

Figura 22 – Imagem da área eucalipto no ano de 2007

A análise dos resultados para o período 2000-2007 indica que as alterações antrópicas ocorridas na área de estudo não foram captadas pelo saldo de radiação ou o índice de degradação energética, pois era esperado que com o aumento da biomassa de plantio, a eficiência em degradar a energia também fosse alterada. O mesmo resultado é obtido quanto à retirada da biomassa do sistema, quando apesar de se esperar que a eficiência da degradação energética seja diminuída, uma vez que se diminui a biomassa, não foi identificada alteração dos resultados dos cálculos do saldo de radiação e de eficiência energética.

4.3.3 Análise do cultivo da floresta

Para a investigação da incidência de energia antrópica dentro do sistema de floresta, foram utilizadas imagens dos anos de 2000 a 2010, com intervalos bienais (2000, 2002, 2004, 2006, 2008 e 2010). Por ser uma floresta em estágio avançado de regeneração, a alteração antrópica da área é muito reduzida, não havendo registros das mesmas. Dessa forma, considera-se que as fontes de energia incidente tenham sido apenas as previstas nos ciclos de origem natural. Assim como as entradas de energia, as retiradas energéticas também são de origem natural, sem

as alterações externas. Este cenário projeta a área com um comportamento de estabilidade dos índices de degradação energética, para o período estudado.

Os estudos realizados na área de floresta demonstraram valores médios (para um período de 10 anos) de $432,81 \text{ W m}^{-2}$, com valores máximos de $448,75 \text{ W m}^{-2}$ e mínimos de $390,71 \text{ W m}^{-2}$. Furlan et al. (2011) estudaram a alteração antrópica em uma área da região norte do Brasil (floresta Amazônica) onde duas áreas de florestas apresentavam valores de $507,56 \text{ W m}^{-2}$ a $646,04 \text{ W m}^{-2}$ e $760,00$ a $780,00 \text{ W m}^{-2}$. Quando uma das áreas foi substituída por pastagens, os valores obtidos foram $680,00$ a $700,00 \text{ W m}^{-2}$ e $760,00$ a $780,00 \text{ W m}^{-2}$ respectivamente, indicando que a vegetação tipo floresta utilizou mais a energia disponível, degradando melhor os fluxos energéticos incidentes. Tal comportamento espectral também foi observado nos trabalhos de Liberato et al. (2011), que estimou que para as áreas de florestas, os valores de RN variaram de $507,56$ a $646,00 \text{ W m}^{-2}$. Bezerra et al. (2008) mapeou áreas de vegetação florestal e encontrou valores de 600 W m^{-2} , sendo que para as áreas de vegetação de florestas nativas com alturas ligeiramente superiores, o valor foi de $700,00 \text{ W m}^{-2}$. Para a vegetação tipo floresta, Uda (2012) encontrou valores de RN próximos a $532,00 \text{ W m}^{-2}$ em áreas de reflorestamento e $526,00 \text{ W m}^{-2}$ para floresta nativa. Andrade et al. (2009) também detectaram a variação espectral em estudos radiométricos na vegetação nativa, porém relacionaram as diferenças entre os valores de saldo de radiação com os diferentes valores de albedo das respectivas áreas de estudo.

Foram analisados os anos de 2000, 2002, 2004, 2006, 2008 e 2010 por meio de imagens de satélite das áreas de estudo para floresta natural.

No ano de 2000, foram utilizadas imagens dos meses de maio (Figura 23), e outubro, com os valores de NDVI de 0,531 e saldo de radiação de $447,47 \text{ W m}^{-2}$, com um valor de eficiência na degradação energética de 58%. A temperatura extraída das imagens de satélites foi de $21,26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e o índice de chuvas de 81,24 mm para o período (CIIAGRO, 2000).

Para o período correspondente ao ano de 2002, foram utilizadas imagens de outubro e fevereiro, cujo NDVI médio foi de 0,640, um resultado 20% maior que o do período anterior. O valor de saldo de radiação foi de $445,60 \text{ W m}^{-2}$, valor bem próximo ao do período de 2000, de 0,42% assim como o índice de análise energética de 58%.

Figura 23 – Imagem da área floresta no mês de maio de 2000

A temperatura extraída das imagens de satélites foi de 22,87 °C e o índice de chuvas de 102,98 mm (CIIAGRO) sendo este o item que apresentou maior diferença (26,75%), em relação aos resultados da tomada anterior, podendo ter influenciado os cálculos do índice de área foliar.

Para o ano de 2004 (Figura 24), foram utilizadas imagens dos meses de março, junho, setembro e novembro. A temperatura média (extraída das imagens de satélites) foi de 23,65 °C, superior aos anos de 2000 e 2002 (11,24% e 3,41% respectivamente), com um índice de chuvas de 96,32 mm e valor de NDVI que foi de 0,540, próximo ao calculado nos períodos anteriores.

Figura 24 – Imagem da área floresta no mês de junho de 2004

O saldo de radiação foi de $440,48 \text{ W m}^{-2}$, próximo aos valores dos anos de 2000 e 2002, variando 1,57% e 1,15%, sendo que o índice de degradação energética foi de 58%, mesmo valor do ano de 2000.

Os resultados referentes ao ano de 2006 (Figura 25) foram extraídos das imagens dos meses de abril, junho e julho. A temperatura de referência (extraída das imagens de satélite) foi de $17,42 \text{ }^{\circ}\text{C}$, com um índice pluviométrico de 127,75 mm (CIIAGRO, 2006).

Figura 25 – Imagem da área floresta no mês de maio de 2006

O valor de NDVI calculado para o intervalo foi de 0,616, estando próximo aos valores calculados para o ano de 2002, quando a incidência de chuvas também ultrapassou os 100 mm. O valor referente ao saldo de radiação foi de $390,76 \text{ W m}^{-2}$, 10% maior em relação ao período anterior. Se comparado aos anos anteriores (2000, 2002, 2004) o valor referente ao saldo de radiação apresentou pouca variação: 12,68%, 12,32% e 11,30% respectivamente. A análise de degradação energética aponta este ano como o de melhor eficiência energética, com 63% de eficiência, valores próximos ao encontrados nos anos anteriores que foram 60% para o ano de 2000, 58% para o ano de 2002 e 58% para o ano de 2004.

Para o ano de 2008, foram utilizadas imagens dos meses de abril, junho e julho, das quais extraiu-se a média de NDVI de 0,578 e o saldo de radiação de $432,76 \text{ W m}^{-2}$. A temperatura média extraída das imagens foi de $17,21^{\circ}\text{C}$, com uma incidência de chuva de 119,81 mm (CIIAGRO, 2008).

O NDVI apresentou uma redução de 6% em comparação ao ano de 2006, porém o resultado ainda se manteve próximo às leituras obtidas nos anos anteriores: 2000 (0,530) , 2002 (0,640), 2004 (0,540) e 2006 (0,620). O valor do saldo de radiação foi 10,76% maior em comparação ao período anterior (2006) e de 1,75% maior em relação ao ano de 2004.

Comparado a 2002, o valor de RN foi maior em 2,88%, e para o primeiro ano da série (2000), o valor de RN foi 3,29% maior. A análise dos valores de RN demonstra que os valores estão próximos na média de todos os anos, com destaque para a variação do ano de 2006. Considerando que houve pouca variação dos índices de cobertura, de temperatura e de chuva na área, a diferença de valores pode estar relacionada a outros parâmetros que não foram contemplados nesse estudo, como dados relacionados ao fotoperíodo, vento, pressão do ar ou parâmetros relacionados as imagens de satélite.

A eficiência na degradação energética foi de 61%, valor compatível aos levantados nos anos anteriores, tendo sido a maior diferença encontrada no ano de 2002, com RN de $0,580 \text{ W m}^{-2}$.

A última leitura foi efetuada no ano de 2010 (Figura 26), nos meses de junho e agosto com uma temperatura de superfície de $20,67^\circ\text{C}$ e pluviosidade de 93,39 mm. Com um valor de NDVI de 0,511, este resultado apresenta uma diferença de 11,64%, se comparada ao ano anterior, mas está próximo aos outros valores calculados para a cultura.

Figura 26 – Imagem da área floresta no mês de agosto de 2010

O saldo de radiação foi de $448,75 \text{ W m}^{-2}$ e variou cerca de 3,69% em relação ao ano anterior, 1,88% do ano de 2004 e 14,86% do ano de 2006. O índice de degradação energética foi de 60% para este ano, que em comparação ao ano anterior variou 1,64%. A maior diferença detectada foi de 3,23% a partir do ano de 2006 e de 3,45% do ano de 2002.

A análise geral da área de floresta aponta que o ambiente é estável e não sofreu alterações significativas nos anos estudados. A pouca variação do índice de degradação energética pode refletir a maturidade do ambiente, o que nas imagens de satélite pode ser identificado na temperatura de superfície menor frente às outras culturas abordadas.

4.4 Comparação entre as culturas.

A principal finalidade no estudo comparativo entre as culturas, é a verificação da alteração dos fluxos energéticos em biosistemas com diferentes relações antrópicas quanto à adoção de energias externas.

A primeira área a ser estudada foi a de cana-de-açúcar, cultura de manejo anual, com uma dinâmica de produção intensa. Os cálculos de fluxo de massa indicam a entrada de cerca de $21,82 \text{ GJ ha}^{-1}$, com uma eficiência energética de $281,40 \text{ GJ ha}^{-1}$. Com uma queda de produção crescente conforme os ciclos produtivos, existe uma sistemática entrada de energia no sistema, seja para plantio ou colheita. Os estudos de fluxo de massa identificam essas entradas e seus impactos dentro da contabilidade energética do sistema, sendo possível a identificação da queda gradativa da eficiência energética do plantio. Este comportamento de decréscimo não foi identificado nos estudos de balanço radiométrico, sendo que o índice de degradação energética não acompanhou o movimento descendente. Conclui-se que uma vez que houve diferentes intensidades de energia incidente no cultivo, as quais não foram identificadas nos cálculos de degradação energética radiométrica, esta entrada de energia antrópica não alterou a degradação da energia radiométrica do sistema.

Esse mesmo comportamento pode ser observado no cultivo de eucalipto, cultura de manejo agrícola diferente da cana-de-açúcar, onde a maior incidência de

energia no sistema se dá no início do ciclo (plantio) e no seu final (colheita). Durante o desenvolvimento do cultivo as entradas de energia são menos intensas, sendo que este comportamento tem a sofrer alteração próximo ao 7º ano da cultura. A contabilidade energética do eucalipto para o período estudado foi de 302,95 GJ ha⁻¹, para 5,17 GJ ha⁻¹ de energia investida (ROMANELLI, 2007).

Quando uma quantidade de energia é investida em um cultivo florestal, espera-se que com o desenvolvimento dessa cultura, parte da energia seja incorporada em biomassa. Essa conversão energética em biomassa é de ordem crescente e relacionada com a eficiência em degradar energia e espera-se que os resultados de balanço energético radiométrico sejam capazes de acompanhar essa evolução.

As áreas já estavam ocupadas com eucalipto antes do início do mapeamento por imagens de satélite, tendo sido calculado um valor inicial para a degradação energética e a partir desse período, sua evolução foi acompanhada. Durante o tempo em que a área foi mapeada, o índice correspondente à degradação energética permaneceu estável, sem apresentar acréscimo anual correspondente ao ganho de biomassa da plantação. Mesmo nos períodos em que ocorreram a colheita e plantio de novas árvores, essa variação antrópica não foi identificada nas leituras extraídas por imagens de satélites.

Como na cultura de cana-de-açúcar, os fluxos energéticos de origem antrópica utilizados no manejo da cultura não foram identificados nos resultados dos índices de degradação energética, mesmo quando ocorreram atividades na área.

A terceira área analisada foi a da floresta em estágio avançado de regeneração, que por estar localizada em área de reserva legal está protegida e sobre a qual não foi considerada intervenção antrópica visando seu desenvolvimento ou manutenção. Devido a essa característica, as análises de degradação energética deveriam apresentar um comportamento diferente das áreas que receberam influência antrópica. Porém, no intervalo estudado de 10 anos a vegetação pouco sofreu alterações, o que foi ilustrado pela análise da ocupação do solo e do índice de vegetação, que se manteve dentro da faixa de variação prevista para esse tipo de biossistema, sem grandes mudanças nos valores computados.

O saldo de radiação também se manteve constante e dentro dos valores referenciados nos estudos. Os valores da degradação energética se mantiveram constantes, com poucas alterações quanto à eficiência em degradar energia, variando de 58% a 61%, o que leva à dedução de que a variação na taxa de

degradação energética foi influenciada por fatores edafoclimáticos, uma vez que a área não recebeu interferências antrópicas.

A comparação quanto à eficiência na degradação energética aponta a área de cana-de-açúcar como a vegetação mais eficiente, com 64% da eficiência. A segunda mais eficiente foi a área de eucalipto com 63% e a área com menor desempenho foi a área de floresta com 60%.

Os resultados contrariam os estudos de Schneider e Kay (1992), pois os pesquisadores concluíram que ambientes com maior maturidade, possuem uma taxa de degradação energética mais eficiente. A contrariedade nos resultados pode ter relação com fatores locais, uma vez que nas áreas de cana-de-açúcar e eucalipto foram identificado corpos d'água, que podem ter alterado os cálculos para a determinação da onda longa emitida e onda curta incidente, embora haja divergências sobre o tema. Alguns pesquisadores questionam se a relação entre transpiração e respiração das plantas está mais diretamente relacionada com os processos de maximização da água pela planta do que necessariamente com os mecanismos de dissipação energética e diminuição da entropia do sistema.

Os valores de EROI (Tabela 24), que são os relativos à energia líquida por área cultivada, apresentam valores em torno de 65% maiores para a cana-de-açúcar, em relação aos valores do eucalipto. Os valores indicam uma superioridade no cultivo quanto à sua eficiência energética, o que foi identificado nas análises radiométricas.

Tabela 24 - Dados comparativos entre a cultura de cana-de-açúcar e eucalipto

Parâmetro	Cana-de-açúcar	Unid.	Eucalipto	Unid.
Comparativo				
Produtividade	290,00	m ³	41,50	m ³
Energia de entrada		GJ ha ⁻¹		GJ ha ⁻¹
	21,82	ano ⁻¹	5,17	ano ⁻¹
Energia de saída		GJ ha ⁻¹		GJ ha ⁻¹
	304,21	ano ⁻¹	308,14	ano ⁻¹
Balanço energético		GJ ha ⁻¹		GJ ha ⁻¹
	281,40	ano ⁻¹	302,95	ano ⁻¹
EROI	12,94	MJ ha ⁻¹	8,35	MJ ha ⁻¹
Eficiência de	64,00	%	63,00	%
degradação energética				

Se comparados pelo estudo de balanço energético via estudo do fluxo de massa, a cultura de eucalipto é apontada como a mais eficiente energeticamente, com uma investida de 5,17 GJ ha⁻¹, para uma produção de 308,14 GJ ha⁻¹, enquanto a cana-de-açúcar teve 21,82 GJ ha⁻¹ como energia de entrada para uma energia de saída de 304,21 GJ ha⁻¹.

5 CONCLUSÃO

Os métodos para os cálculos de balanço energético radiométrico utilizados nesse estudo indicaram que a intensidade do fluxo energético antrópico não alterou a eficiência da degradação energética nas culturas analisadas.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A.N. Bases para o estudo da Amazônia brasileira. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 16, n. 45, p. 7-30, maio/ago. 2002.
- ADDISCOTT, T.M. Entropy, non-linearity and hierarchy in ecosystems. **Geoderma**, Harpenden, v. 160, p. 57-63, 2010.
- AGUILAR, F.X.; SONG, N.; SHIFLEY, S. Review of consumption trends and public policies promoting woody biomass as an energy feedstock in the U.S. **Biomass and Energy**, Columbia, v. 35, p. 3708-3718, 2011.
- ANDRADE, N.L.R.; RANDOW, C.V.; PIRANTE FILHO, N.; MANZINI, A.O.; AGUIAR, L.J.G.; CARDOSO, F.L. Partição do saldo de radiação em áreas de floresta amazônica e floresta de transição Amazônia-Cerrado. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 24 n. 3, p. 346-355, set. 2009.
- ALLEN, R.G.; TREZZA, R.T.M. **Surface energy balance algorithms for land: advance training and users manual**. Version 1.0. Idaho: Kimberly, 2002. 98 p.
- _____. Analytical integrated functions for daily solar radiation on slopes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Kimberly, v. 139, p. 55-73, 2006.
- ALMENIDA, A. Biomassa: uma oportunidade para a agricultura? Aula Magna, in: CONFERÊNCIA DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 2009, Trás-os-Montes. Trás-os-Montes; Associação Portuguesa de Estudantes de Agricultura, 2009. p. 2-4.
- ANDERSON, M.C.; KUSTAS, W.P.; NORMAN, J. M. Upscaling tower and aircraft fluxes from local to continental scales using thermal remote sensing. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, p. 240-254, 2007.
- ANDRADE, R.G.; SEDIYAMA, G.C.; BATISTELLA, M.; PAZ, A.R. de; LIMA, E.P.; NOGUEIRA, S.F. Mapeamento de parâmetros biofísicos e da evapotranspiração no Pantanal usando técnicas de sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 2., 2009, Corumbá. **Anais...** Corumbá: Embrapa Informática Agropecuária; INPE, 2009. p. 695-704.
- ANDRESS, D. **Ethanol energy balances**. Kensington: Office of Biomass Programs, U.S. Department of Energy, 2002. 6 p.
- ARAÚJO, T.L. **Estimativa da temperatura e do saldo de radiação à superfície terrestre em Maceió – Al utilizando imagens TM/Landsat 5**. 2006. 112 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

ARRAES, F.D.D. **Dinâmica do balanço de energia na bacia hidráulica do açude Orós e suas adjacências**. 2010. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

ASSAD, E.D.; SANO, E. E. **Sistemas de informações geográficas: aplicações na agricultura**. Brasília: Embrapa, SPI, 1998. 434 p.

ASSAD, L.T.; BURSZTYN, M. **Aquicultura no Brasil: bases para um desenvolvimento sustentável**. Brasília: CNPq, Ministério da Ciência e Tecnologia, 2000. p. 1-38.

BARUT, Z.B.; ERTEKIN, C.; KARAAGAC, H.A. Tillage effects on energy use for corn silage in Mediterranean Coastal of Turkey. **Energy**, Oxford, n. 36, p. 5466-5475, 2011.

BASTIAANSEN, W.G.M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**. 1995. 237 p. Thesis (Ph.D.) - Wageningen Agricultural University, Wageningen, 1995.

_____. SEBAL: based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey 1999. **Journal of Hydrology**, Reston, n. 229, p. 87–100, 2000.

BASTIAANSEN, W.G.M.; SAMIA, A. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Adana, v. 94, p. 321-340, Feb. 2003.

BEZERRA, B.G.; SILVA, B.B. da; FERREIRA, N.J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais tm - landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Campina Grande, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.

BEZERRA, M.V.C.; SILVA, B.B.; BEZERRA, B.G. Avaliação dos efeitos atmosféricos no albedo e NDVI obtidos com imagens de satélite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 7, p. 709-717, 2011.

BOEGH, E.; SOEGAARD, H.; THOMSEN, A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. **Remote Sensing of Environment**, Copenhagen, n. 79, p. 329-343, 2002.

BRAND, M.A. **Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem**. 2007. 169 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço energético nacional**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2012. 281 p.

BRITO, J.O.; CINTRA, T.C. Madeira para energia no Brasil: realidade, visão, estratégica e demandas de ações. **Renabio - Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 2, p. 157-163, 2004.

BUENO, O.D.C.; QUINTANA, N.R.G. Avaliação energética do preparo do solo para implantação da cultura do eucalipto: subsídio para uma análise de sustentabilidade. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Campinas. **Anais...** Campinas, 2004. p. 1-10.

CAMPOS, A.T.; CAMPOS, A.T. de. Balanços energéticos agropecuários: uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agrossistemas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1977-1985, 2004.

CARVALHO, T.M.; LATRUBESSE, E.M. Aplicação de modelos digitais do terreno (MDT) em análises macrogeomorfológicas: o caso da bacia hidrográfica do Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Goiânia, v. 5, n. 1, p. 85-93, 2004.

CASTANHO FILHO, E.P. Floresta e bioenergia. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 38, n. 2, p. 52-67, 2008.

CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS. **Resenha agrometeorológica**. Disponível em: <<http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Listagens/Resenha/LResenhaLocal.asp>>. Acesso em: 30 set. 2012.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA. **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>>. Acesso em: 27 set. 2012.

CEZARE, C.H.G.; FERREIRA, N.C. **Interpolador geoestatístico como ferramenta de predição da vegetação nativa em áreas antropizadas no bioma cerrado em Goiás e no Distrito Federal**. Goiânia: SBPC, , 2011. p. 1-5.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and post calibration dynamic ranges. **IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing**, Sioux Falls, v. 41, n. 11, p. 2674-2677, 2003.

CIEGS, R.; CIEGS, R. Laws of thermodynamics and sustainability of the economy. **Engineering Economics**, Kaunas, n. 2, p. 15-22, 2008.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO MÉDIO PARANAPANEMA. **Dados da bacia hidrográfica**. Disponível em: <<http://cbhmp.org/publicacoes/relatorio-zero.html>>. Acesso em: 02 fev. 2011.

COMITRE, V. **Avaliação energética e aspectos econômicos da *filière* soja na Região de Ribeirão Preto - SP**. 1993. 164 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

CORTEZ, C.L; VELÁZQUEZ, S.M.S.G.; COELHO, S.T.; MOREIRA, J.R.; AMENDOLA, F.C.B.; GAVIOLI, F. Análise do processo produtivo do eucalipto no sistema “short rotation” para uso como combustível em uma usina termoeletrica. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, 4. **Anais...** Curitiba: Cenbio, 2009. p. 1-7.

COSTA, C.V. **Políticas de promoção de fontes novas e renováveis para geração de energia elétrica: lições da experiência europeia para o caso brasileiro**. 2006. 233 p. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético - Departamento de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

COUTO, L.C.; COUTO, L; WATZLAWICK, L.F.; CÂMARA, D. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 1, p. 71-92, 2004.

CROW, W.T.; KUSTAS, W.P. Utility of assimilating surface radiometric temperature observations for evaporative fraction and heat transfer coefficient retrieval. **Boundary-Layer Meteorology**, Beltsville, v.115, p. 105-130, 2005.

CURRIE, D.J.; PAQUIN, V. Large scale biogeographical patterns and species richness of trees. **Nature**, London, v. 329, p. 326-327, 1987.

DEGANUTTI, R. **Inventário da cobertura vegetal das fazendas Lageado e Edgardia – Botucatu, S.P. no período de 36 anos, com utilização de imagens de sensoriamento remoto**. 2000. 188 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2000.

DELEAGE, J.P.; JULIEN, J.M.; SAUGET-NAUDIN N.; SOUCHON, C. Eco-energetics analysis of an agricultural system: the French case in 1970. **Agro-ecosystems**, Amsterdam, v. 5, p. 345-365, 1979.

EPIPHANIO, J.C.N.; LUIZ, A.J.B.; FORMAGGIO, A.R. Estimativa de áreas agrícolas municipais, utilizando sistema de amostragem simples sobre imagens de satélite. **Bragantia**, Campinas, v. 61, n. 2, p. 187-197, 2002.

ERDAL, G.; ENSENGÜN, K.; ERDAL, H.; GÜNDÜZ, O.; Energy use and economical analysis of sugar beet production in Tokat province of Turkey. **Energy**, Tokat, v. 32, p.35-41, 2005.

FAO. **Wood energy: promoting sustainable energy systems**. Rome: Forest Products Division, 2003. 24 p.

FERNANDES, H.C.; SILVEIRA, J.C.M.; RINALDI, P.C.N. Avaliação do custo energético de diferentes operações agrícolas mecanizadas. **Ciências Agrotécnicas**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1582-1587, set./out. 2008.

FLORENZANO, T.G. **Os satélites e suas aplicações**. São José dos Campos: Sindicato dos Servidores Públicos Federais na Área de Ciência e Tecnologia do Vale do Paraíba, 2008. 52 p.

FRIEDL, M.A. Forward and inverse modeling of land surface energy balance using surface temperature measurements. **Remote Sensing of Environment**, Boston, v. 79, p. 344–354, 2002.

FURLAN, D.N.; BALLESTER, M.V.R.; ANDRADE, R.G. Estimativa dos valores de saldo de radiação e fluxo de calor no solo em diferentes condições antrópicas na bacia do rio Ji-Paraná, Rondônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 6301.

GALLO, K.P.; BROOKS, C.C.; DAUGHTRY, C.S.T.; BAUER, M.E.; VANDERBILT, V.C. Spectral estimates of intercepted solar radiation by corn and soybean canopies. **Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium**, Indiana, v. 1, n. 1, p. 190-198, 1982.

GAZZONI, D.L.; FELICI, P.H.N.; MACHADO, R.; CORONATO, S.; RALISCH, R. Balanço energético das culturas de soja e girassol para produção de biodiesel. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 2, n. 4, p. 259-265, 2005.

GIESKE, A. The iterative flux-profile method for remote sensing applications. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 24, n. 16, p. 3291-3310, 2003.

GIONGO, P.R.; MOURA, G.B.A.; SILVA, B.B.; ROCHA, H.R. da; MEDEIROS, S.R.R. de; NAZARENO, A.C. Albedo à superfície a partir de imagens Landsat 5 em áreas de cana-de-açúcar e cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 3, p. 10-25, mar. 2010.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, São Paulo, n. 72, p. 6-15, dez./fev. 2006/2007.

_____. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: EDUSP, 2008. 400 p.

GOMES, H.B.; SILVA B.B. da; CAVALCANTI, E.P.; ROCHA, H.R. da. Balanço de radiação em diferentes biomas no estado de São Paulo mediante imagens Landsat 5. **Geociências**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 153-164, 2009.

GONÇALVES, F.A.; SANJINES-ARGANDOÑA, E.J.; FONSECA, G.G. Utilization of agro-industrial residues and municipal waste of plant origin for cellulosic ethanol production. **Journal of Environmental Protection**, Dourados, n. 2, p. 1303-1309, 2011.

GUARDABASSI, P.M. **Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia perspectivas para países em desenvolvimento**. 2006. 126 p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Faculdade de Economia e Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

GUSMÃO, A.C.V.L.; SILVA, B.B. da; MONTENEGRO, S.M.G.L.; GALVINÍCIO, J.D.; Determinação do saldo radiativo na Ilha do Bananal, TO, com imagens orbitais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 10, jul. p. 1107-1107, 2012.

HENNENBERG, K.; DRAGISIC, C.; HAYE, S.; HEWSON, J.; SEMROC, B.; SSAVY, C.; WIEGMANN, K.; FEHRENBACH, H.; FRISTSCHKE, U.R. The power of bioenergy-related standards to protect biodiversity. **Conservation Biology**, Washington, v. 24, n. 2, p.412-423, July 2009.

HENRIQUE JR., M.F.; DANTAS, F.; SCHAEFFER, R. Potential for reduction of CO2 emissions and a low-carbons cenario for the Brazilian industrial sector. **Energy Policy**, Rio de Janeiro, v. 38, p. 1946-1961, 2010.

HETZ, E.J.; VILLEGAS, H.B.; RIQUELME, J.S.; CELIS, J.H. Utilizacion de energia en la produccion de raps, bajo cuatro sistemas de labranza, en la Provincia de Ñuble. **Agro Sur**, Valdivia, v. 22, n. 1, p. 1-6, jan. 1994.

HOOGWIJK, M.; FAAIJ, A.; BROEK, R.V.D.; BERNDES, D.G.; TURKENBURG, W. Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy. **Biomass & Bioenergy**, Utrecht, v. 25, p. 119-133, 2002.

HOOGWIJK, M.; FAAIJ, A.; EICKHOUT B.; VRIES, B. de; TURKENBURG, W.; Potential of biomass energy out to 2100, for four IPCC SRES land-use scenarios, **Biomass & Bioenergy**, Utrecht, v. 29, p. 225-257, 2005.

INSTITUTO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS. **Dados meteorológicos**. Disponível em: < <http://www.ipmet.unesp.br/>>. Acesso em: 28 set. 2012.

IPPOLITI-RAMILO, G.A.; EPIPHANIO, J.C.N.; SHIMABUKURO, Y.E.; FORMAGGIO, A.R. Sensoriamento remoto orbital como meio auxiliar na previsão de safras. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v. 46, n. 1, p. 89-101, 1999.

KALLURI, S.; BERGMAN, P.G. The potential of remote sensing data for decision makers at the state, local and tribal level: experiences from NASA's Synergy program. **Environmental Science & Policy**, Upper Marlboro, v. 6, p. 87-500, 2003.

KEIRSTEAD, J.; SAMSATLI, N.; PANTALEO, A.M.; SHAH, N. Evaluating biomass energy strategies fora UK eco-town with an MILP optimization model. **Biomass and Bioenergy**, London, v. 39, p. 306-316, 2012.

KHAN, A.S.; FOX, R.W. Net energy analyses of ethanol production from sugarcane in northeast Brazil. **Biomass**, London, n. 2, p. 213-221, 1982.

KLEIDON, A.; LORENZ, R. **Entropy production by earth system processes**. Heidelberg: Springer Verlag, 2004. Disponível em: <http://home.iitk.ac.in/~osegu/Entropy_Prod1.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2011.

KUSTAS, W.P.; NORMAN, J.M.; ANDERSON, M.C.; FRENCH, A.N. Estimating subpixel surface temperatures and energy fluxes from the vegetation index-radiometric temperature relationship. **Remote Sensing of Environment**, Beltsville, v. 85, p. 429-440, 2003.

LIBERATO, A.M.; SILVA, B.B.; CARDOSO, F.L. Uso de técnicas de sensoriamento remoto na estimativa do saldo de radiação em Rondônia. **Revista Pesquisa & Criação**, Rondônia, v. 10, n. 2, p. 153-164, jul. 2010

LIU, W.T.H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Ed. Uniderp, 2007. 908 p.

LUVALL J.C.; HOLBO H.R. Measurements of short term thermal responses of Coniferous forest canopies using thermal scanner data. **Remote Sensing Environment**, Washington, v. 27, p. 1-10, 1989.

MACEDO, I.C. **Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: situação atual, oportunidades e desenvolvimento**. 10 p. Brasília: CGEE, 2001.

MARCELINO, E.V.; FORMAGGIO, A.R.; D'ÁLGE, J.C.L. A influência do datum planimétrico no registro de imagens. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 333-340.

MARTINS, I.C.M.; SOARES, V.P.; SILVA, E.; BRITES, R.S. Diagnóstico ambiental no contexto da paisagem de fragmentos florestais naturais "ipucas" no município de Lagoa da Confusão, Tocantins. **Sociedade de Investigações Florestais**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 299-309, 2002.

MATTOS, R.S.; VEIGA, A. Otimização de entropia: implementação computacional dos princípios max ent e min ent. **Pesquisa Operacional**, Juiz de Fora, v. 22, n. 1, p. 37-59, jan./jun. 2002.

MEDINA, J.L.; CAMACHO, E.; RECA, J.; LÓPEZ, R.; ROLDÁN, J. Determination and analysis of regional evapotranspiration in southern Spain based on remote sensing and GIS. **Physical, Chemical and Earth**, Córdoba, v. 23, n. 4, p. 427-432, 1998.

MEIRELES, M. **Estimativa da evapotranspiração real pelo emprego do algoritmo SEBAL e imagem Landsat 5 - TM na bacia do Acaraú – CE.** 2007. 88 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

MENEGUELLO, L.A.; CASTRO, M.C.A. O Protocolo de Kyoto e a geração de eergia elétrica pela biomassa da cana-de-açúcar como mecanismo de desenvolvimento limpo. **Interações**, Campo Grande, v. 8, n. 1, p. 33-43, mar. 2007.

MENEZES, S.J.M.C.; SEDIYAMA, G.C.; SOARES, V.P.; GLERIANI, J.M.; ANDRADE, R.G. Estimativa dos componentes do balanço de energia e da evapotranspiração em plantios de eucalipto utilizando o algoritmo SEBAL e imagem Landsat 5. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 649-657, 2011.

MENKES, M. **Eficiência energética, políticas públicas e sustentabilidade.** 2004. 295 p. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável,) - Centro de Desenvolvimento Sustentável. Universidade de Brasília, 2004.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **NASA's Plan for a climate-centric architecture for earth observations and applications from space.** Washington, 2010. 49 p.

NORMAN, J.M.; ANDERSON, M.C.; KUSTAS, W.P.; FRENCH, A.N.; MECIAKALSKI, J.; TORN, R.; DIAK, G.R.; SCHUMUGGE, T.J.; TANNER, B.C. Remote sensing of surface energy fluxes at 101-m pixel resolutions. **Water Resources Research**, Madison, v. 39, n. 8, p. 18, 2003.

ODUM, E.P. **Ecologia.** Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1983.

ODUM, H.T. **Environmental accounting: energy and environmental decision making.** New York: John Wiley, 1996. 370 p.

OLIVEIRA JÚNIOR, E.D.D. **Análise energética de dois sistemas de colheita mecanizada de eucalipto.** 2005. 91 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

PAIVA, C.M. **Estimativa do balanço de energia e da temperatura da superfície via satélite Noaa-Avhrr.** 2005. 218 p. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas em Engenharia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PERECIN, D; LANDELL, M.H.de A; XAVIER, M.A., ANJOS, I.A. dos; BIDOIA, M,A,P; SILVA, D.N. da. Progresso Agrônômico e Genético Em Programa De Melhoramento De Cana-de-Açúcar. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v.27, n.2, p.279-287, 2009.

PICOLI, M.C.A. **Estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar utilizando agregados de redes neurais artificiais**: estudo de caso Usina Catanduva. 2007. 93 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

PINO, F.A. Área cultivada e ICMS. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 29, n. 3, p. 7-14, 1999.

PONTES, P.P.B.; ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R.A.C. Análise temporal de índices de vegetação como subsídio à previsão de safras de cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 217–224.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Ed. Parêntese, 2007. 127 p.

QUADROS, K.R.; KOKUSZKA, R. Balanço energético em sistemas de produção convencional e agroecológico de feijão, na região de Rebouças - PR. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Cruz alta, v. 2, n. 1, p. 50-54, fev. 2007.

RADAMBRASIL. **Projeto Radam Brasil**. Programa de Integração Nacional Levantamento de Recursos Naturais. Brasília: Ministério das Minas e Energia, Secretaria Geral, 1981. v. 22, 524 p.

RAMOS, V.S.; DURIGAN, G.; FRANCO, G.A.D.C.; SIQUEIRA, M.F. de; RODRIGUES, R.R. **Árvores da floresta estacional semidecidual**: guia de identificação de espécies. São Paulo: EDUSP, 2008. 320 p.

RÍPOLI, T.C.C.; MOLINA JR., W.F.; RÍPOLI, M.L.C. Energy potential of sugar cane biomass in Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 677-681, out./dez. 2000.

ROLIM, G.S.; ESCOBEDO, J.F.; OLIVEIRA, A.P. Validation of the deardorff model for estimating energy balance components for a sugarcane crop. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n. 4, p. 325-334, jul./ago. 2008.

ROMANELLI, T.L. **Sustentabilidade energética de um sistema de produção da cultura de eucalipto**. 2007. 121 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiróz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

RUDORFF, B.F.T.; SUGAWARA, L.M. Mapeamento da cana-de-açúcar na região Centro-Sul via imagens de satélites. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, n. 241, p. 79-86, nov./dez. 2007.

RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO B.F.T.; CEBALLOS, J.C. **O sensor Modis e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Editora Parêntese, 2007. 423 p.

RUDORFF, B.F.T.; BERKA, L.M.S.; MOREIRA, M.A.; DUARTE, V.; ROSA, V.G.C. **Estimativa de área plantada com cana-de-açúcar em municípios do estado de São Paulo por meio de imagens de satélites e técnicas de geoprocessamento: ano safra 2004/2005**. São José dos Campos: INPE, 2004. 54 p.

SACHS, I. A revolução energética do século XXI. **Estudos Avançados**, São Paulo, n. 21, p. 21-38, 2007.

SALLA, D.A.; CABELLO, C. Análise energética de sistemas de produção de etanol de mandioca, cana-de-açúcar e milho. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 25, n. 2, p. 32-53, 2010.

SALLA, D.A.; FURLANETO, F.P.B.; CABELLO, C.; KANTHACK, R.A.D. Avaliação energética da produção de etanol utilizando como matéria-prima a cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 8, n. 39, p.2516-2520, nov. 2009.

_____. Estudo energético da produção de biocombustível a partir do milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 9, p.2017-2022, set. 2010.

SANTANA, R.C.; BARROS, N.F. de; NEVES, J.C.L. Biomassa e conteúdo de nutrientes de procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns sítios florestais do Estado de São Paulo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 56, p. 155-169, dez. 1999.

SARTORI, M.M.P.; FLORENTINO, H.O. Energy balance optimization of sugarcane crop residual biomass. **Energy**, Oxford, v. 32, n. 2007, p. 1745-1748, 2005.

SCHNEIDER, E.D.; KAY, J.J. Life as a manifestation of the second law of thermodynamics. **Mathematical and Computer Modeling**, Waterloo, v. 19, n. 6/8, p. 25-48, 1992.

SEABRA, J.E.A.; TAO, L.; CHUM, H.L.; MACEDO, I.C. A techno-economic evaluation of the effects of centralized cellulosic ethanol and co-products refinery options with sugarcane mill clustering. **Biomass and Bioenergy**, Golden, v. 34, p. 10665-1078, 2010.

SHEN, W.; WU, G.; SUN, Z.; XIONG, W.; FU, Z.; XIAO, R. Study on classification methods of remote sensing image based on decision tree technology. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND SERVICE SYSTEM, 2011, Beijing. **Proceedings...** Nanjing: INSPEC, 2011. p. 4058-4061.

SILVA, B.B. da. **Balanço de energia com técnicas de sensoriamento remoto e imagens de satélite**: mini curso. Porto Alegre: Universidade Federal de Campina Grande, 2005. 18 p.

SILVA, B.B.; LOPES, G.M.; AZEVEDO, P.V. de. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – tm. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Campina Grande, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.

SILVA, C.R.A.; GARRAFA, M.T.F.; NAVARENHO, P.L.; GADO, R.; YOSHIMA, S. A biomassa como alternativa energética para o Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, São Paulo, n. 2, p. 25-36, dez. 2004.

SILVA, L.; COSTA, J.F F.; LIMA, E.R.V.; ALMEIDA, H.A. Análise do albedo e do índice de vegetação da diferença normalizada (ndvi) em uma bacia hidrográfica, usando o SEBAL - Surface energy balance algorithm for land. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13., 2009, Viçosa. Viçosa: UFV, 2009. p. 54-70.

SIQUEIRA, R.; GAMERO, C.A.; BOLLER, W. Balanço de energia na implantação e plantas de cobertura do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 19, n. 1, p. 80-89, set. 1999.

SOBRINO, J.A.; JIMÉNEZ-MUNÓZ, J.C; PAOLINI, L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. **Remote Sensing of Environment**, Burjassot, v. 90, p. 434-440, 2004.

SOUZA, Z.J. **A co-geração de energia no setor sucroalcooleiro**: desenvolvimento e situação atual. São Carlos: USP, Departamento de Engenharia de Produção, 2002. 11p.

STRASKRABA, M.; JORGENSEN, S.E.; PATTEN, B.C. Ecosystems emerging: 2. Dissipation. **Ecological Modeling**, Ceske Budejovice, v.117, n. 117, p. 3-39, 1999.

SZCZODRAK, J.; FIEDUREK, J. Biomass and bioenergy. **Biomass and Bioenergy**, Lublin, v. 10, n. 5, p. 367-375, Sept. 1995.

TORRE DE PALACIOS, L.D.L. Natural resources sustainability: iron ore mining, **Dyna**, Medellín, v. 78, n. 170, p. 227-234, Dec. 2011.

TOUSSAINT, O.; SCHNEIDER, E.D. The thermodynamics and evolution of complexity in biological systems. **Comparative Biochemistry and Physiology Part A.**, Namur, n. 120, p. 3-9, 1998.

UDA, P.K. **Avaliação da evapotranspiração real da bacia do alto Rio Negro, região sul brasileira, por meio do modelo SEBAL**. 2012. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

ULANOWICZ, R.E. Quantitative methods for ecological network analysis. **Computational Biology and Chemistry**, Solomons, n. 28, p. 321-339, 2004.

VEIGA, M.M. Agrotóxicos: eficiência econômica e injustiça socioambiental. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 145-152, 2007.

VICENS, R.S.; AGAREZ, F.V.; CRUZ, C.M.; NOGUEIRA, C. As variações temporais do NDVI e a dinâmica do funcionamento hídrico em paisagens de tabuleiros costeiros no Norte do Espírito Santo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. p. 1785-1793.

WALSH, S.J.; BUTLER, D.R.; MALANSON, G.P. Na overview of scale, pattern, process relationships in geomorphology: a remote sensing and GIS perspective. **Geomorphology**, Chapel Hill, v. 21, p. 183-205, 1998.

ANEXOS

Anexo A - Valores médios de onda longa emitida para cana-de-açúcar

Tabela A.1 – Valores médios de onda longa emitida na área de cana-de-açúcar

Ano	Onda Longa Emitida Wm^2	Número de Coberturas
2005	422,73	3 passagens
2006	450,21	3 passagens
2007	407,04	3 passagens
2008	412,19	3 passagens
2009	433,48	3 passagens
2010	422,28	3 passagens
Total de passagens do satélite		18 passagens

Wm^2	Wm^2	Wm^2	Wm^2	Wm^2	Wm^2	Wm^2
< 380	380 - 390	390 - 400	400 - 410	410 - 420	421 - 450	> 450

Figura A.1 – Onda Longa Emitida ($W m^2$) da superfície em suas datas correspondentes

Anexo B - Valores de onda longa emitida para eucalipto

Tabela B.1 – Valores médios de onda longa emitida da área de eucalipto

Ano	Onda Longa Emitida Wm^2	Número de Coberturas
2000	416,49	4 passagens
2001	393,45	3 passagens
2003	409,21	2 passagens
2004	408,09	3 passagens
2005	413,76	4 passagens
2006	419,52	3 passagens
2007	418,98	2 passagens
Total de passagens do satélite		21 passagens

Figura 6 – Onda Longa Emitida ($W m^2$) da superfície nas datas (a) 20/09/2000, (b) 06/08/2001, (c) 15/10/2003, (d) 08/04/2004, (e) 01/08/2005, (f) 14/04/2006, (g) 14/04/2006

Anexo C - Valores de onda longa emitida para floresta

Tabela C.1 – Valores médio de onda longa emitida da área de floresta

Ano	Onda Longa Emitida Wm^2	Número de Coberturas
2000	413,84	2 passagens
2002	426,52	2 passagens
2004	423,53	5 passagens
2006	393,02	4 passagens
2008	392,85	3 passagens
2010	410,59	3 passagens
Total de passagens do satélite		19 passagens

Figura C.1 – Onda Longa Emitida ($W m^2$) da superfície nas datas (a) 13/10/2000, (b) 04/07/2004, (c) 21/004/2006, (d) 15/07/2008, (e) 01/08/2005, (f) 19/06/2010

Anexo D - Valores de temperatura cana-de-açúcar

Tabela D.1 – Valores médios de temperatura de superfície para áreas de cana-de-açúcar

Período/ Ano	Temperatura em °C
2005	22,60
2006	24,89
2007	20,00
2008	21,00
2009	24,79
2010	20,55
Média	22,31

Wm^{-2}	Wm^{-2}	Wm^{-2}	Wm^{-2}	Wm^{-2}	Wm^{-2}	Wm^{-2}
< 12	12 - 16	16 - 20	20 - 24	24 - 28	28 - 32	> 32

Figura D.1 – Temperatura de Superfície (°C) da superfície nas datas (a) 09/04/2005, (b) 06/03/2006, (c) 30/03/2007, (d) 26/09/2008, (e) 24/08/2009, (f) 20/08/2010

Anexo E - Valores de temperatura eucalipto

Tabela E.1 – Valores médios de temperatura de superfície para a área de eucalipto

Período	Temperatura °C
2000	15,89
2001	18,74
2003	20,20
2004	19,63
2005	21,00
2006	19,91
2007	18,36
Média	19,10

Wm ⁻²	Wm ⁻²	Wm ⁻²	Wm ⁻²	Wm ⁻²	Wm ⁻²	Wm ⁻²
< 12	12 - 16	16 - 20	20 - 24	24 - 28	28 - 32	> 32

Figura E.1 – Temperatura de Superfície (°C) da superfície nas datas (a) 20/09/2000, (b) 06/08/2001, (c) 15/10/2003, (d) 08/04/2004, (e) 01/08/2005, (f) 14/04/2006, (g) 14/04/2006

Anexo F - Valores de temperatura floresta

Tabela F.1 – Valores médios de temperatura de superfície para a área de floresta

Período	Temperatura °C
2000	21,26
2002	22,87
2004	22,92
2006	19,04
2008	17,21
2010	18,15
Média	20,25

Wm ⁻²	Wm ⁻²	Wm ⁻²	Wm ⁻²	Wm ⁻²	Wm ⁻²	Wm ⁻²
< 12	12 - 16	16 - 20	20 - 24	24 - 28	28 - 32	> 32

Figura F.1 – Temperatura de Superfície (°C) da superfície nas datas (a) 22/05/2000, (b) 10/04/2002, (c) 04/07/2004, (d) 21/04/2006, (e) 15/07/2008, (f) 19/06/2010

Anexo G - Valores de saldo de radiação cana-de-açúcar

Tabela G.1- Valores médios saldo de radiação (Wm^2) para a área de cana-de-açúcar

Ano	Saldo de Radiação Wm^2
2005	431,77
2006	418,10
2007	463,23
2008	383,23
2009	540,59
2010	515,27
Média	458,70

Figura G.1 – Saldo de Radiação (W m^2) da superfície nas datas (a) 09/04/2005, (b) 06/03/2006, (c) 30/03/2007, (d) 24/08/2008, (e) 26/08/2009, (f) 29/08/2010

Anexo H - Valores de saldo de radiação eucalipto

Tabela H.1 - Valores médios saldo de radiação (Wm^2) para a área de eucalipto

Ano	Média Saldo de Radiação Wm^2
2000	446,42
2001	450,03
2003	420,00
2004	450,00
2005	429,22
2006	452,85
2007	423,84
Média	438,90

Figura H.1 – Saldo de Radiação (Wm^2) da superfície nas datas (a) 20/09/2000, (b) 06/08/2001, (c) 15/10/2003, (d) 08/04/2004, (e) 01/08/2005, (f) 14/04/2006, g) 06/08/2007

Anexo I - Valores de saldo de radiação floresta

Tabela I.1 - Valores médios saldo de radiação (Wm^{-2}) para a área de floresta

Ano	Média Saldo de Radiação Wm^2
2000	446,42
2001	450,03
2003	420,00
2004	450,00
2005	429,22
2006	452,85
2007	423,84
Média	481,35

Figura I.1 – Saldo de Radiação (W m^2) da superfície nas datas (a) 22/05/2000, (b) 10/04/2002, (c) 04/07/2004, (d) 21/04/2006, (e) 15/07/2008, (f) 19/06/2010

Anexo J - Valores de degradação energética para cana-de-açúcar, eucalipto e floresta

Tabela J.1 - Valores médios de degradação energética (Wm^2) para as área de cana-de-açúcar, eucalipto e floresta

	Cana-de-açúcar	Eucalipto	Floresta
Balanço Energético (watts/m ²)	722,96	709,34	616,07
Degradação Energética (%)	0,65	0,67	0,60