



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA – UniCEUB
FACULDADE DE CIÊNCIAS DA EDUCAÇÃO E DA SAÚDE – FACES
PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

PEDRO FILIPE BOSCO DOS SANTOS

MAPEAMENTO HIDROENERGÉTICO DO PLANALTO CENTRAL
CANA-DE-AÇÚCAR X HIDRELÉTRICAS

BRASÍLIA
2017



PEDRO FILIPE BOSCO DOS SANTOS

**MAPEAMENTO HIDROENERGÉTICO DO PLANALTO CENTRAL
CANA-DE-AÇÚCAR X HIDRELÉTRICAS**

Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica apresentado à Assessoria de Pós-Graduação e Pesquisa pela Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – FATECS

Orientação: Dr.Sc. Bruno Collischonn

BRASÍLIA

2017

MAPEAMENTO HIDROENERGÉTICO DO PLANALTO CENTRAL: cana-de-açúcar x hidrelétricas

Pedro Filipe Bosco dos Santos - UniCEUB, PIC voluntário

pedrobosco_dossantos@hotmail.com

Bruno Collischonn – UniCEUB, professor orientador

bruno.collischonn@uniceub.br

A maior parcela da energia consumida no Brasil, cerca de 70%, provém de usinas hidrelétricas, que dependem da ocorrência de vazões nos rios. Por outro lado, desde a década de 1970 o país foi um pioneiro no desenvolvimento de biocombustíveis, principalmente no etanol de cana-de-açúcar. Mesmo tendo apresentado altos e baixos em anos recentes, o potencial da geração de energia a partir da cana é alto, não somente por meio do etanol, mas também da cogeração por queima do bagaço e palha. A expansão sustentável do cultivo de cana-de-açúcar passa pelo aumento da produtividade, e um dos fatores que possibilitam esse aumento é o uso da irrigação, principalmente nas regiões mais quentes do país. Com o aumento da irrigação, esta atividade passa a competir com o setor hidrelétrico pelo uso da água. No presente trabalho, foi feita uma delimitação espacial das áreas mais apropriadas para cultivo irrigado de cana-de-açúcar no Brasil, por meio de um critério hidroenergético, ou seja, a partir de sua comparação com uma alternativa de uso da mesma água para geração hidrelétrica. Ênfase foi dada à região central do Brasil, que apresenta especial vocação para o crescimento de ambos os setores. Os resultados mostraram que na maior parte do território, o uso da água para bioenergia tende a ser mais vantajoso do que na geração hidrelétrica, em particular se considerada a possibilidade de cogeração. Considera-se que este tipo de análise pode ser importante quando da ocorrência de conflitos pelo uso da água, no sentido de estabelecer prioridades na bacia hidrográfica.

Palavras Chave: cana-de-açúcar, hidrelétricas, hidroenergia, recursos hídricos, irrigação

Sumário

1. Introdução	1
2. Objetivos	3
3. Fundamentação Teórica.....	4
3.1. Energia hidrelétrica.....	4
3.2. Bioenergia da cana-de-açúcar: etanol e cogeração	5
3.3. Trabalhos relacionados	7
4. Metodologia	7
4.1. Escala de trabalho.....	7
4.2. Produtibilidade das hidrelétricas.....	8
4.3. Produtibilidade da cana de açúcar	11
4.4. Mapeamento final	14
5. Resultados e Discussão	14
6. Considerações finais	19
7. Referências	20

Lista de figuras

Figura 1 - Crescimento da área cultivada com cana na bacia hidrográfica do rio Paranaíba (ANA, 2013).....	6
Figura 2 – Hidrografia do Brasil versão 2013 e detalhe da divisão de ottobacias no Distrito Federal	8
Figura 3 - Relação entre perdas hidráulicas no circuito de geração e potência instalada, a partir de dados do SIGEL, usada para preenchimento de dados para cálculo da produtividade	9
Figura 4 - Relação entre rendimento médio do gerador e potência instalada.....	9
Figura 5 - Relação entre rendimento médio da turbina e potência instalada.....	9
Figura 6 - Localização das hidrelétricas consideradas	10
Figura 7 - Produtividades da cana-de-açúcar por região, safras 2014/2015 (verde) e 2015/2016 (cinza) (CONAB, 2015).....	12
Figura 8 - Resultado da preferência hídrica para o cenário 1 (uso da cana somente para produção de etanol).....	15
Figura 9 - Mapa Altimétrico e Político do Brasil (http://murilocardoso.com , 2017)	16
Figura 10. Resultado da preferência hídrica para o cenário 2 (uso da cana para produção de etanol e cogeração).....	17

Lista de abreviaturas

ANA- Agência Nacional de Águas

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ÚNICA - União das Indústrias da Cana-de-Açúcar

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

CGH – Central Geradora Hidrelétrica

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

UHE – Usina Hidrelétrica

SIN – Sistema Interligado Nacional

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

SIGEL – Sistemas de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico

SIPOT – Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro

ELETOBRAS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

FAOCLIM – *Food and Agriculture Organization Worl-Wide Agroclimatic Data Base*

1. Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é considerada a cultura agrícola mais produzida do mundo, sendo colhidas mais de um bilhão de toneladas por ano (CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento, 2013). É uma biomassa que pode ser transformada quase que totalmente em energia aproveitável através de processos industriais, que na sua maioria, já são dominados e conhecidos e apresentam alto índice de aproveitamento dos subprodutos e, relativo baixo impacto ambiental.

Produto estreitamente ligado à história do País, a cana-de-açúcar experimenta uma fase de forte expansão, gerada pelas perspectivas acerca da produção do etanol. Com a necessidade de diminuir a dependência dos combustíveis de origem fóssil, aliada à preocupação com as questões ambientais, o uso do etanol está tomando proporções mundiais, estimulando a expansão do cultivo da cana-de-açúcar (Aguiar, Silva, Rudorff, Sugawara, & Carvalho, 2009). A irrigação é uma prática benéfica para agricultura, pois proporciona condições adequadas de água no solo durante o ciclo da cultura, desde que conduzida com técnica e sistema adequados. Aumentos na produtividade da cana-de-açúcar, quando irrigada de forma plena, são observados extensamente na literatura (FARIAS, FERNANDES, DANTAS NETO, & GHEYI, 2008) e (DALRI & CRUZ, 2008).

De acordo com o IBGE, o cultivo de cana-de-açúcar no Brasil ocupa cerca de 9,5 milhões de hectares, o equivalente a 1% do território nacional, sendo este destaque mundial no uso de energias renováveis. O setor sucroenergético possui papel chave nesta participação, uma vez que somente os produtos da cana-de-açúcar são responsáveis por 15,7% de toda a oferta de energia do país, sendo o etanol e a bioeletricidade, atualmente, os principais responsáveis pelo crescimento das fontes alternativas de energia no Brasil. Em 2010, o uso do etanol substituiu mais da metade do uso da gasolina, por exemplo (União das Indústrias de Cana-de-Açúcar - UNICA, 2016).

Beneficiando-se desse cenário, a produção nacional de cana-de-açúcar apresentou, com o auxílio do programa Proalcool e alavancada pelo início da comercialização de carros bicombustíveis no começo de 2003, até a safra 2013/14 um aumento na produção de mais de 84%. (Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, 2015).

Além do etanol, a produção de bioeletricidade é uma das atividades da indústria sucroenergética mais significativas e com maior potencial de crescimento no setor. Por meio

da queima do bagaço em caldeiras, as cerca de 400 usinas de açúcar e etanol existentes no país geram eletricidade para abastecer suas próprias atividades e, desta forma, são auto-suficientes em energia. Uma parte delas - atualmente pouco mais de 100 - ainda gera excedentes comercializáveis (União das Indústrias de Cana-de-Açúcar - UNICA, 2016)

De acordo com a União da Indústria de cana-de-açúcar, a bioeletricidade é um modal de geração energética que está em franca expansão. Desde o ano de 2010 até o de 2015, a produção a partir de biomassa cresceu aproximadamente 116%, passando de uma produção de 10414 GWh para 22572 GWh. Do valor produzido em 2015, a cana foi a principal responsável com 20169 GWh (aproximadamente 89% da produção). Estimativas indicam que em 2020 esta participação poderá chegar a 18%, reduzindo a necessidade da utilização de usinas térmicas movidas à energia fóssil (União das Indústrias de Cana-de-Açúcar - UNICA, 2016). Isso justificando a cana-de-açúcar a maior atenção nessa pesquisa.

O setor sucroenergético foi a terceira maior fonte geradora de energia no país, perdendo apenas para o setor hidrelétrico e para as usinas térmicas a gás. Essa participação representou uma economia de 14% de água nos reservatórios e redução de emissões de 8,6 milhões de toneladas (União das Indústrias de Cana-de-Açúcar - UNICA, 2016).

A participação da energia hidráulica na matriz energética nacional, por outro lado, é da ordem de 42%, gerando cerca de 90% de toda a eletricidade produzida no país. Apesar da tendência de aumento de outras fontes, tudo indica que a energia hidráulica continuará sendo, por muitos anos, a principal fonte geradora de energia elétrica do Brasil (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2002).

Ainda segundo o atlas da ANEEL, a energia hidrelétrica é gerada pelo aproveitamento do fluxo das águas em uma usina na qual as obras civis – que envolvem tanto a construção quanto o desvio do rio e a formação do reservatório – são tão ou mais importantes que os equipamentos instalados. A água utilizada no processo é uma das poucas fontes para produção de energia que não contribui para o aquecimento global – o principal problema ambiental da atualidade.

Levando-se em conta que a maior capacidade de geração de energia hidrelétrica está concentrada nas bacias dos rios Paraná (33,3%), São Francisco (17%) e Tocantins (9%) (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2002) e que a maior parte das regiões produtoras de cana também se concentram na região centro-sul do país, todo volume

retirado dos cursos de rio dessas bacias para irrigação de cana-de-açúcar tem interferência direta na capacidade de geração de energia hidrelétrica.

O cenário de escassez requer que os recursos existentes para produção de energia sejam alocados de forma otimizada (LANNA, 2008), ou seja, preferencialmente para a finalidade que gera a maior quantidade de energia por metro cúbico de água utilizado, além, naturalmente, de outros critérios, como restrições ambientais e aptidão agrícola dos solos. Poucos trabalhos no Brasil se dedicaram a abordar o critério energético no planejamento e zoneamento de uso do solo e de recursos hídricos.

Isto posto, a comparação entre o meio de produção de energia mais eficiente é de extrema relevância, pois do contrário, pode-se estar retirando da cascata de hidrelétricas a possibilidade de gerar, por metro cúbico, mais energia, mais limpa e renovável.

Dessa forma, a presente proposta pretende realizar um mapeamento das áreas mais apropriadas, do ponto de vista hidroenergético, para a expansão de cultivos agrícolas irrigados, levando em conta a indisponibilidade da água consumida para geração hidrelétrica.

2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é delimitar as áreas mais apropriadas para cultivo irrigado de cana-de-açúcar na região central do Brasil, por um critério hidroenergético, ou seja, a partir da sua comparação com uma alternativa de uso da mesma água para geração hidrelétrica.

Como objetivos específicos, pretende-se:

- a) Realizar a avaliação de forma dinâmica, levando em conta o uso da cana somente para produção de etanol ou considerando também a cogeração;
- b) Ampliar a análise para outras regiões do país

Entende-se que o trabalho proposto se justifica na medida em que dá elementos para os tomadores de decisão a respeito de um melhor zoneamento do uso do solo, em particular no que diz respeito à expansão agrícola da cana-de-açúcar. Do cruzamento desse mapeamento com outros planos de informação, como restrições ambientais e aptidão agrícola dos solos, pode resultar um instrumento de planejamento bastante interessante.

Se justifica também pois o critério energético pode se tornar um critério para priorização do uso da água, por parte dos comitês de bacia hidrográfica. Por fim, quase não foram

identificados trabalhos similares na literatura consultada, em particular para a realidade brasileira, onde ambas as fontes de energia têm caráter estratégico para a segurança energética do país.

A hipótese norteadora do trabalho é que é possível mapear áreas propícias à expansão da irrigação de cana-de-açúcar, por meio da comparação da energia que pode ser gerada com a mesma quantidade de água em um empreendimento alternativo (a geração hidrelétrica).

3. Fundamentação Teórica

3.1. Energia hidrelétrica

A conversão da energia potencial da água em energia elétrica em usinas hidrelétricas é um processo amplamente conhecido na hidráulica há vários séculos. A partir da elevação do nível d'água, por meio de um barramento, é possível conduzir a água por meio de um conduto, onde a energia potencial é convertida em energia de pressão. Esta, por sua vez, aciona a rotação de uma turbina, cuja energia mecânica é convertida em energia elétrica através da ligação com um gerador. A potência gerada depende, portanto, diretamente da queda (desnível) do barramento e da vazão turbinada.

As condições hidrográficas do Brasil fizeram com que naturalmente a matriz energética do país convergisse para uma dependência bastante forte das hidrelétricas. A porcentagem da energia hídrica na produção total de energia do país ainda representa mais de 70% (ONS, 2014), embora este número venha caindo.

Atualmente, o Brasil conta com 219 usinas hidrelétricas em operação, 6 em construção e mais 8 com construção não iniciada (ANEEL, 2017). A característica de interligação da transmissão faz com que a energia gerada possa ser alocada de forma sinérgica e otimizada, permitindo intercâmbios de energia entre as regiões do país e flexibilidade na tomada de decisão quanto à operação do sistema. Além destas, existem ainda centenas de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), cuja potência é inferior a 30MW, e centrais geradoras hidrelétricas (CGHs), com potência inferior a 3 MW, que em geral atendem a demandas locais.

Do ponto de vista da gestão de recursos hídricos, a geração hidrelétrica é um uso dito não-consuntivo, uma vez que toda a água utilizada na geração é devolvida ao rio, não havendo consumo, portanto. Entretanto, a existência de empreendimentos hidrelétricos representa,

de certa forma, uma restrição aos demais usos da água, uma vez que um consumo de água (por exemplo uma captação de água para irrigação ou abastecimento público) na bacia hidrográfica situada a montante do empreendimento acaba por reduzir a afluência e conseqüentemente a quantidade de água que pode ser turbinada. Em alguns casos, essa competição pelo uso chega a comprometer a energia gerada e criar conflitos, como na bacia hidrográfica do rio São Marcos (Costa Silva et al, 2013).

Devido às suas características físicas (queda e rendimento), cada usina hidrelétrica possui um valor de referência para a sua produtividade, que é a quantidade de energia que pode ser gerada com um metro cúbico de água. Ou seja, sabendo-se a quantidade de água que deixa de estar disponível para o empreendimento hidrelétrico, é possível estimar qual a quantidade de energia que deixa de ser gerada. A produtividade de todas as UHEs do SIN está disponível em ONS (2011).

3.2. Bioenergia da cana-de-açúcar: etanol e cogeração

De forma mais usual, a energia gerada a partir de cana-de-açúcar consiste na fabricação de álcool combustível e etanol, a partir da fermentação da sacarose, substância na qual essa espécie vegetal é rica.

O Brasil é, com mais de 736 milhões de toneladas, o principal produtor de cana-de-açúcar do mundo (OECD/FAO, 2016). Inicialmente voltada para a produção de açúcar, o uso da cana para a fabricação de etanol teve grande estímulo na década de 1970, devido à crise do petróleo nos países árabes, levando o país a investir em alternativas de obtenção de combustíveis.

Entre os estados brasileiros, a maior área cultivada está no estado de São Paulo, tradicional produtor. Entretanto, com o avanço das fronteiras agrícolas, verifica-se um crescimento da área em estados como Goiás, Minas Gerais, Tocantins, além de planos de expansão no Piauí, na Bahia e na região amazônica. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra o forte crescimento da área cultivada com cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba, que abrange parte dos estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Distrito Federal.

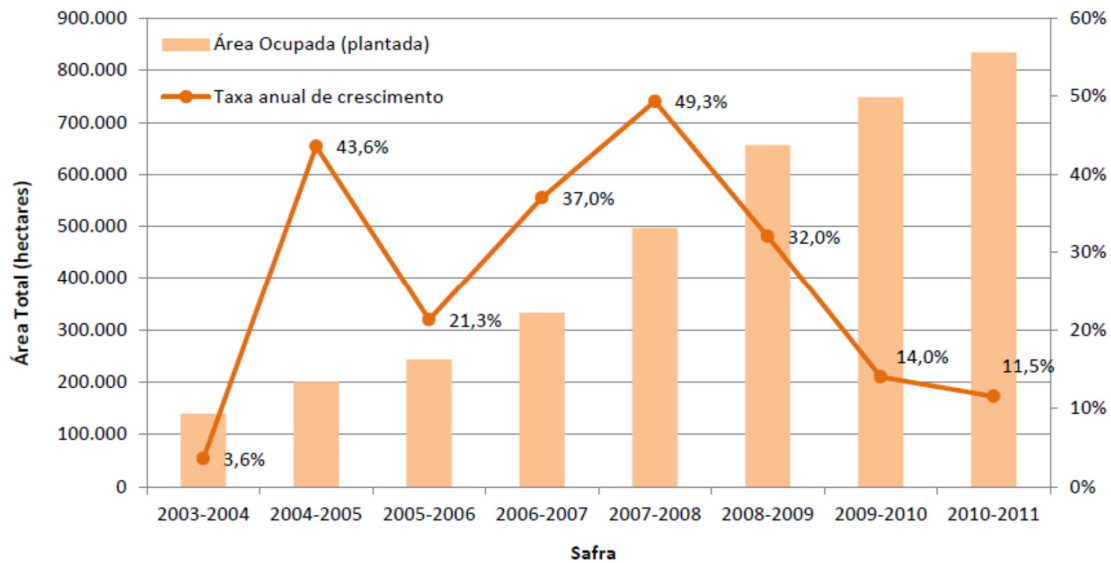


Figura 1 - Crescimento da área cultivada com cana na bacia hidrográfica do rio Paranaíba (ANA, 2013)

Boa parte da área de cana-de-açúcar no país ainda é cultivada por sequeiro, porém com o avanço para regiões mais secas, a irrigação da cana-de-açúcar tem se tornado uma prática cada vez mais recorrente.

De forma aproximada, uma tonelada de cana produz de 85 e 90 litros de etanol (Nova Cana, 2017), sendo que cada litro de etanol hidratado tem um poder calorífico de aproximadamente 5,38 Kcal (Nova Cana, 2017), ou 6,25 Wh. A produtividade do cultivo de cana depende do método de cultivo, da ordem de 88 toneladas por hectare para o cultivo de sequeiro e chegando a 150 toneladas por hectare no caso da cana irrigada. Esses são valores médios, e dependem também da idade do cultivo.

A demanda hídrica por hectare de cana irrigada depende do clima local, podendo ser calculada por FAO (1998). Depende também do método de irrigação, sendo o mais comum a aspersão por canhão, e, em menor medida, o pivô central.

Além do uso para produção de etanol, a indústria canavieira tem se adaptado em anos recentes para gerar energia também a partir do resíduo da moagem, em um processo denominado usualmente de cogeração. Trata-se de um tipo de geração termelétrica, porém usando como combustível o bagaço da cana. Nesses empreendimentos, a queima desse material aquece água, e o vapor resultante aciona uma turbina ligada a um gerador. Uma tonelada de cana gera em torno de 250 a 260 kg de bagaço, e o poder calorífico desse combustível foi estimado em $19,27 \text{ MJ.kg}^{-1}$ (Innocente, 2011).

Os valores mencionados são referências gerais, devendo ser detalhados com base em pesquisas mais aprofundadas na literatura. Com base nesses números, é possível estimar a energia gerada pelo uso da água na irrigação de cana, tanto para produção de etanol quanto na cogeração.

3.3. Trabalhos relacionados

Apesar da importância da energia hidrelétrica e da cana-de-açúcar para o Brasil, foram encontrados poucos trabalhos que se dedicam a fazer uma análise comparativa do uso da água nessas duas modalidades no país. Cabe mencionar o Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar (EMBRAPA Solos , 2009), no qual a questão dos recursos hídricos é brevemente mencionada.

Já na literatura internacional sobre o assunto, destacam-se os trabalhos de Younos e Tulou (2005) e Younos et al. (2012), que abordaram a questão do uso mais eficiente da água para geração de energia, comparando energia hidrelétrica e etanol. Merecem menção também os trabalhos de Mubako e Lant (2008) e de Wu (2012), que se dedicaram a calcular a “pegada hídrica” do etanol de milho no meio-oeste americano. Já Mejean e Hope (2010) fizeram um interessante estudo comparado do balanço de energia do etanol de cana brasileiro e do etanol de milho americano, chegando a resultados que favorecem amplamente o primeiro. Nota-se, portanto, que poucos trabalhos procuram abordar o problema sob a ótica dos recursos hídricos, em particular no Brasil.

4. Metodologia

4.1. Escala de trabalho

Inicialmente, propôs-se realizar a comparação somente para uma área específica, correspondente ao Planalto Central do Brasil. Entretanto, como essa área não está formalmente definida, e a metodologia proposta é altamente replicável, optou-se por aplicá-la a todo o país.

A base geográfica para o trabalho foi a base hidrográfica otocodificada, desenvolvida pela Agência Nacional de Águas (ANA) e disponibilizada em www.snirh.ana.gov.br em sua versão 2013. Essa base possui a hidrografia de todo o país, sendo a maior parte na escala ao

milionésimo, embora algumas bacias hidrográficas já estejam detalhadas em escalas superiores.

Da mesma fonte, obteve-se as ottobacias, ou seja, áreas de contribuição correspondentes a cada trecho da base. A ottocodificação permite identificar como cada ottobacia se situa em relação às demais (se está a jusante ou a montante). Isso é importante no âmbito deste trabalho, uma vez que é necessário identificar quais usinas hidrelétricas situam-se a jusante de uma determinada área irrigada, e portanto são afetadas por ela.

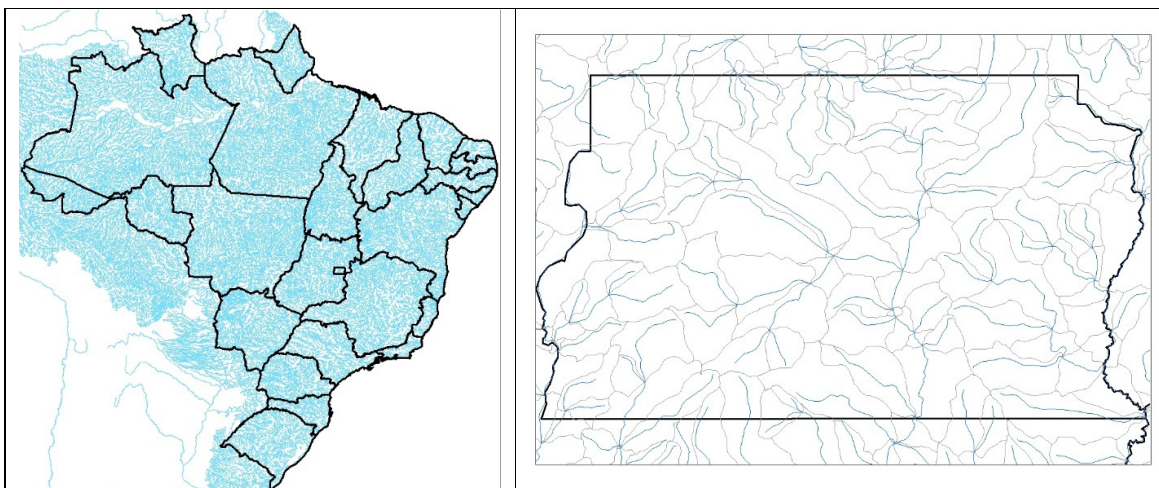


Figura 2 – Hidrografia do Brasil versão 2013 e detalhe da divisão de ottobacias no Distrito Federal

4.2. Produtibilidade das hidrelétricas

Os dados das hidrelétricas foram obtidos do SIGEL. Um total de 645 empreendimentos hidrelétricos possuía dados suficientes para análise. Em alguns casos, não se dispunha dos Níveis d'Água (NAs) de montante e jusante, necessários para o cálculo da produtividade da usina. Sempre que disponível, essa informação foi obtida do SIPOT. O Programa SIPOT é um sistema desenvolvido pela ELETROBRAS, contendo dados de todos os principais empreendimentos hidrelétricos do país, em operação e planejados. Sua disponibilização para este projeto se deu por meio de solicitação formal ao sistema e-sic do governo federal (<https://esic.cgu.gov.br/sistema/site/index.aspx>), com base na lei de acesso à informação.

Em diversos empreendimentos, o SIGEL não dispõe de outras informações que também afetam a estimativa da produtividade: perdas hidráulicas no circuito de geração, rendimento nominal da turbina, rendimento nominal do gerador, taxas de indisponibilidade forçada e programada. Nestes casos, foram ajustadas equações entre potência instalada e a variável desejada, a partir das UHEs onde a informação estava disponível.

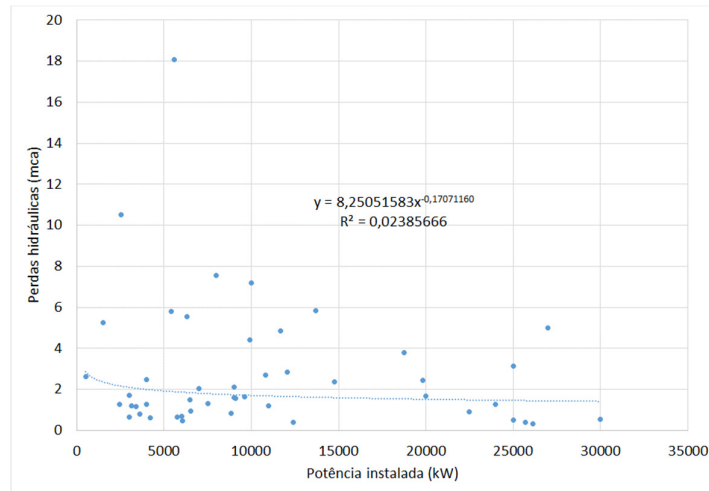


Figura 3 - Relação entre perdas hidráulicas no circuito de geração e potência instalada, a partir de dados do SIGEL, usada para preenchimento de dados para cálculo da produtividade

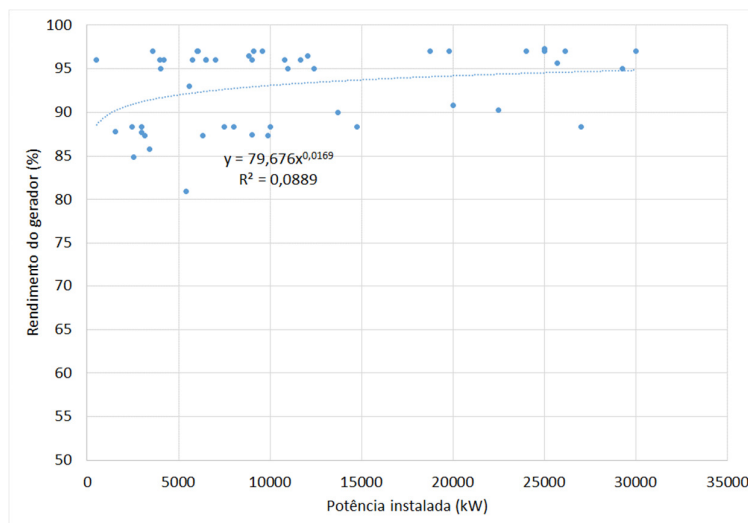


Figura 4 - Relação entre rendimento médio do gerador e potência instalada

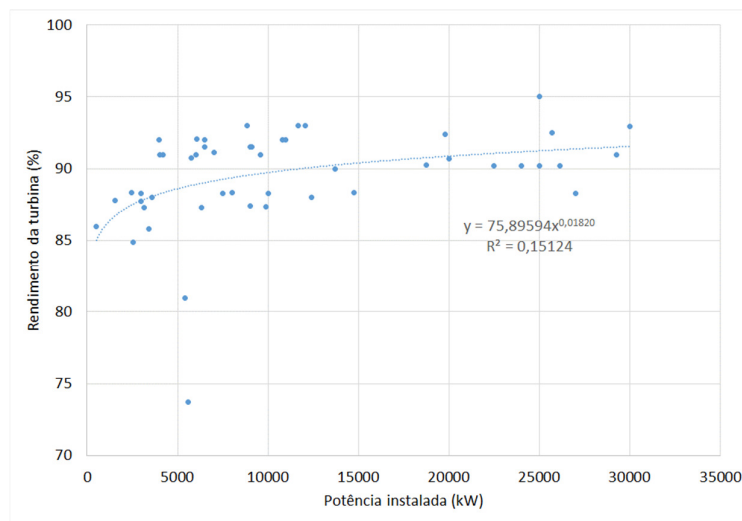


Figura 5 - Relação entre rendimento médio da turbina e potência instalada

Para as taxas de indisponibilidade forçada e programada, adotou-se percentuais de 1,9% e 3,4%, correspondentes à média dos empreendimentos em operação.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a localização das 645 hidrelétricas consideradas na análise.

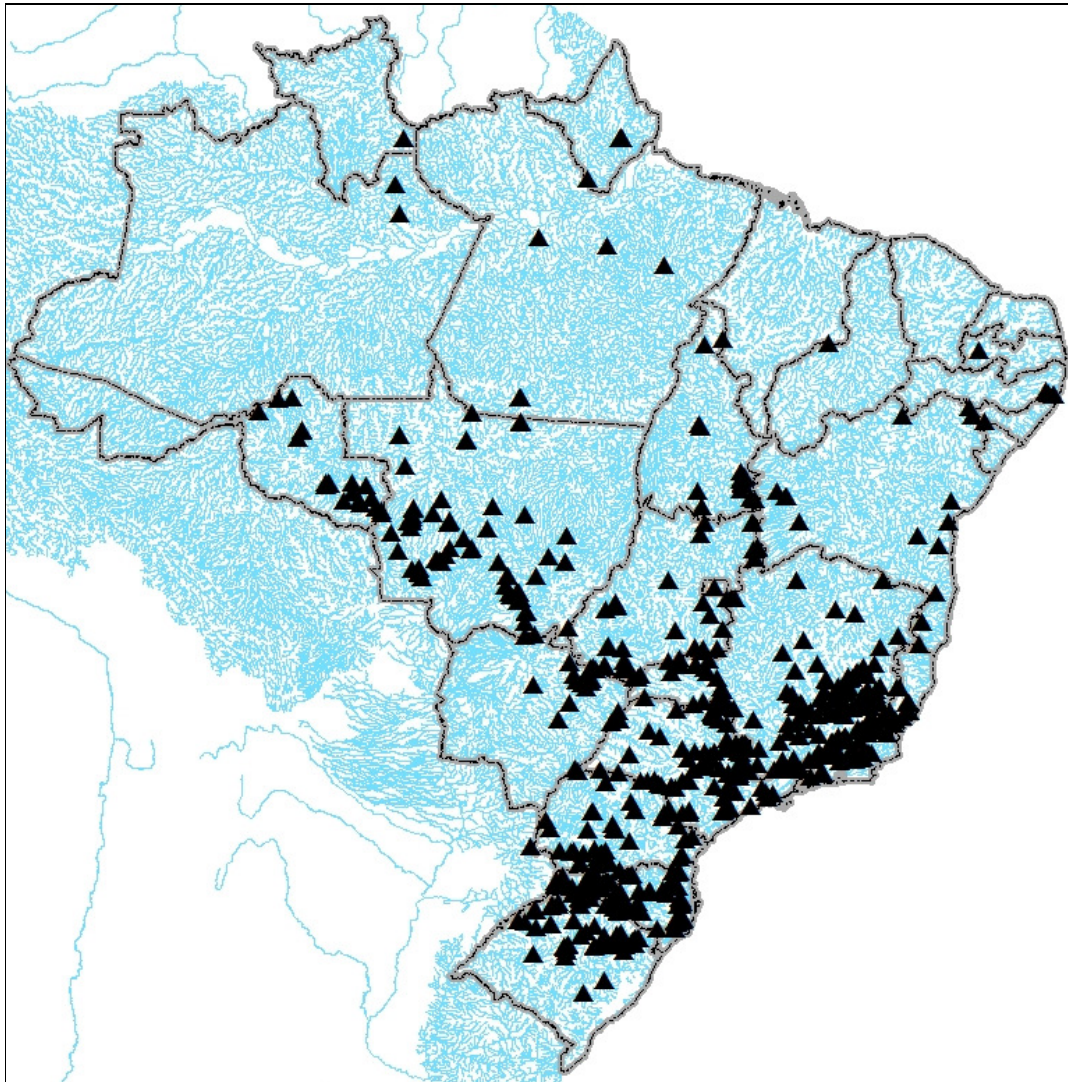


Figura 6 - Localização das hidrelétricas consideradas

A produtividade de cada empreendimento foi então calculada, a partir da formulação abaixo:

$$Prdtbldd \left(\frac{MW}{m^3/s} \right) = \frac{9,81 \cdot (NA_{mont} - NA_{jus} - Phid) \cdot ef_t \cdot ef_g \cdot (1 - ind_f) \cdot (1 - ind_p)}{1000}$$

onde NA_{mont} é o nível d'água a montante (correspondente a 60% do volume útil), NA_{jus} é o NA normal de jusante, $Phid$ são as perdas hidráulicas, ef_t e ef_g são as eficiências da turbina e

do gerador e ind_f e ind_p são as taxas de indisponibilidade forçada e programada, respectivamente.

Cada empreendimento hidrelétrico foi associado a um trecho da base ottocodificada, a partir da proximidade com a hidrografia. Em seguida, para cada ottobacia da base, foi feito o cálculo da produtividade acumulada a jusante. Para isso, foi desenvolvido um programa em Octave® para identificar todas as usinas situadas a jusante de uma dada ottobacia, por meio da lógica de otto¹, e somou-se as produtibilidades da cascata.

Com isso, é possível estimar qual a potência perdida em hidroeletricidade ao retirar-se 1 m³/s de uma dada ottobacia. Por exemplo: ao retirar-se 1 m³/s de água do Lago Paranoá, esta vazão deixa de estar disponível para turbinamento na PCH Paranoá (que produz 0,9 MW com cada m³/s turbinado), na UHE Corumbá I (produtibilidade de 0,56 MW/m³/s), na UHE Itumbiara (produtibilidade de 0,78 MW/m³/s), nas UHEs Cachoeira Dourada, São Simão, Ilha Solteira, Jupia, Porto Primavera, e Itaipu (produtibilidades de 0,28, 0,6, 0,44, 0,21, 0,18 e 1,11 MW/m³/s, respectivamente). Portanto, esta retirada implica em uma perda energética, nas hidrelétricas da cascata, de 5,1 MW. Considerando-se que o consumo per capita anual de energia no Brasil é 2335 kWh (EPE, 2015), correspondente a uma potência de 0,26 kW/pessoa, essa quantidade de energia seria suficiente para atender a uma cidade com cerca de 19 mil habitantes.

Nos trechos da bacia do rio Paraíba do Sul situados a montante da transposição de Santa Cecília, foram somadas ainda as produtibilidades das usinas do sistema Light-Guandu (Nilo Peçanha e Pereira Passos), descontadas da produtividade (negativa) das elevatórias de Santa Cecília e Vigário. Isto porque a lógica de otto não reconhece a água retirada dessa bacia como afluindo a esse sistema.

Naturalmente, diversas ottobacias não se situam a montante de nenhum aproveitamento hidrelétrico, de forma que nesse caso a produtividade a jusante é zero.

4.3. Produtibilidade da cana de açúcar

De forma geral, o cálculo da produtividade da cana de açúcar seguiu o seguinte equacionamento:

¹ Mais detalhes sobre a lógica de otto podem ser encontrados em ANA (2006)

$$Prdtbldd \left(\frac{MWh}{m^3} \right) = \frac{(P_{irr} - P_{seq}) \cdot C_p}{Dem} - Prdtbldd_{bomba}$$

Onde P_{irr} é a produtividade da cana irrigada e P_{seq} , a produtividade da cana de sequeiro, ambas em toneladas/hectare/ano, C_p é o calor específico que pode ser obtido com a cana (em MWh/tonelada), Dem é a demanda de água para irrigação da cana, em m^3 /hectare/ano e $Prdtbldd_{bomba}$ é o consumo específico de energia da bomba usada na irrigação

Os valores necessários para aplicação desse equacionamento foram obtidos de estudos e valores de referência de órgãos públicos.

Em primeiro lugar, considerou-se que a produtividade da cana de açúcar irrigada é de 100 toneladas/hectare². A produtividade da cana de sequeiro, por outro lado, foi arbitrada em 65 toneladas/por hectare. Isso porque o valor médio de produtividade no Brasil (englobando áreas irrigadas e de sequeiro) é de cerca de 70 ton/hectare (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), de forma que o valor médio para sequeiro tende a ser um pouco inferior. Assim, a produtividade efetivamente agregada pelo uso da água é de 35 toneladas/hectare.

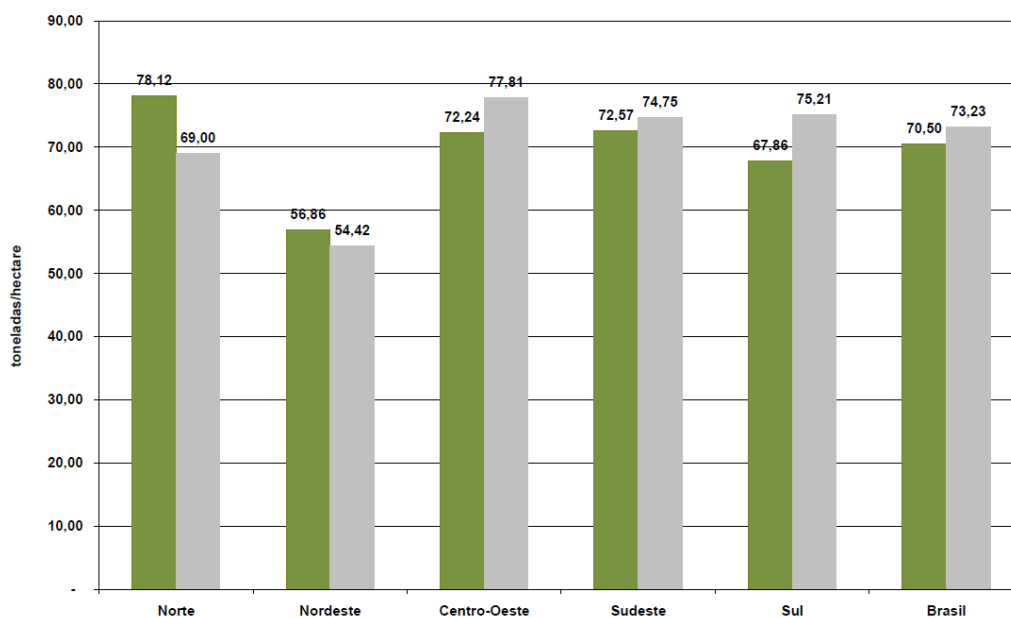


Figura 7 - Produtividades da cana-de-açúcar por região, safras 2014/2015 (verde) e 2015/2016 (cinza) (CONAB, 2015)

Como exceção, considerou-se que nas ottobacias situadas em municípios do semi-árido a produtividade da cana de sequeiro é zero, ou seja, não há possibilidade de cultivo sem

² A variabilidade de produtividades para a cana irrigada é alta, tendo sido encontrados valores desde 100 ton/ha (<http://www.coopercitrus.com.br/?pag=revista&p=materia&codigo=6386>) até 250 ton/ha (<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/10691479/adubacao-e-irrigacao-fazem-cana-aumentar-produtividade-no-cerrado>). Optou-se por adotar o menor valor desse intervalo.

irrigação. Para definição da abrangência do semi-árido, considerou-se a portaria nº89, de 16 de março de 2005, do Ministério da Integração Nacional.

A conversão da massa de cana em energia foi estimada considerando dois cenários: no cenário 1, considerou-se que a cana destina-se somente à produção de etanol, com uma taxa de conversão de 90 litros de etanol hidratado por tonelada de cana, e um poder calorífico de 5380 cal por litro de etanol (Nova Cana, 2017). Convertendo as unidades, tem-se um poder calorífico de 0,416 MWh gerado a cada tonelada de cana produzida.

A maior parte das usinas de cana têm capacidade de alternar a produção entre etanol e açúcar, dependendo do preço de cada produto. Entretanto, o calor específico do açúcar apresenta resultados bastante similares, de forma que os resultados não variam de acordo com a alocação produtiva da usina de cana.

No cenário 2, considera-se que além do etanol, a usina pode produzir energia pela queima do bagaço. Nesse caso, adotou-se uma geração média de 319 kWh (0,319 MWh) a cada tonelada de cana pré-moagem. Estima-se uma demanda interna de vapor e energia na termelétrica, correspondente a 35 kWh por tonelada pré-moagem.

Para estimativa do consumo de água na irrigação, arbitrou-se a cada ottobacia um vetor de evapotranspiração potencial de referência e um vetor de precipitação efetiva provável. Estes dados foram obtidos a partir do sistema NewLocClim, desenvolvido pela FAO para estimar evapotranspiração de referência para várias localidades no mundo, a partir dos dados climáticos disponíveis (http://www.fao.org/nr/climpag/pub/en3_051002_en.asp). A cada ottobacia, foi arbitrado o vetor de evapotranspiração do município mais próximo.

Assim, o volume captado para irrigação de um hectare de cana pode ser calculado por

$$Dem \left(\frac{m^3}{ha \cdot mês} \right) = \frac{(E_{tr} \cdot k_c - P_p) \cdot 10}{ef}$$

Onde E_{tr} é a evapotranspiração de referência no mês, P_p é a precipitação efetiva provável (com 80% de permanência) no mês, k_c é o coeficiente de cultivo da cana e ef é a eficiência de irrigação.

Arbitrou-se uma eficiência de irrigação de 70%, correspondente ao método de aspersão, que possivelmente seja o método mais comum para irrigação de cana no país. Adotou-se ainda um coeficiente de cultivo de 1,2 para a cana. O cálculo da demanda foi feito mês a mês, de forma a estimar o volume necessário para um ano de cultivo.

A energia usada no bombeamento da água para irrigação também foi levada em conta, de forma a descontar a produtividade líquida propiciada pela cana-de-açúcar. Para isso, considerou-se que a altura manométrica total de uma área irrigada de cana seja de 80 mca (incluindo pressão de serviço), e a eficiência do conjunto moto-bomba seja de 70%. Com isso, resulta uma produtividade negativa de 1,12 MW/m³/s, ou 0,31 kWh/m³.

Dividindo-se a produção específica de energia, em MWh/ton/ano, pelo consumo específico, em toneladas/ano por metro cúbico de água acrescido, em cada cenário, foi possível calcular a produtividade da cana, em MW/m³/s, para cada ottobacia da base.

4.4. Mapeamento final

Ao fim desse processamento, a cada ottobacia do país foram associados três valores de produtividade: o primeiro, associado às hidrelétricas da cascata a jusante; o segundo, considerando a energia específica da irrigação considerando o uso da cana somente para produção de etanol; e o terceiro contemplando produção de etanol acrescida da cogeração. O mapeamento final consistiu em especializar essas informações de forma simples, de forma a permitir a identificação rápida de áreas mais propícias para uma ou outra forma de geração hidroenergética. Para isso, foi calculado em cada ottobacia um indicador de preferência, resultante da divisão da produtividade hidrelétrica acumulada pela produtividade da cana, em cada cenário.

Nas ottobacias em que o indicador resultou inferior à unidade, a preferência é pelo uso para hidrelétricas, uma vez que o mesmo volume de água gera mais energia na cascata do que se alocado para irrigação de cana. Por outro lado, nas ottobacias em que o valor foi superior à unidade, a preferência é pela irrigação, caso em que foi dividida em duas categorias: preferência moderada, para valores do indicador até cinco, e preferência alta, para valores superiores a cinco.

5. Resultados e Discussão

A Erro! Fonte de referência não encontrada. abaixo mostra o mapa resultante do cenário 1, em que a produção é somente dedicada à produção de etanol. Na legenda da imagem estão quatro descrições: a primeira, em azul delimita os locais onde a água deve ser preferencialmente destinada a produção de energia hidrelétrica.

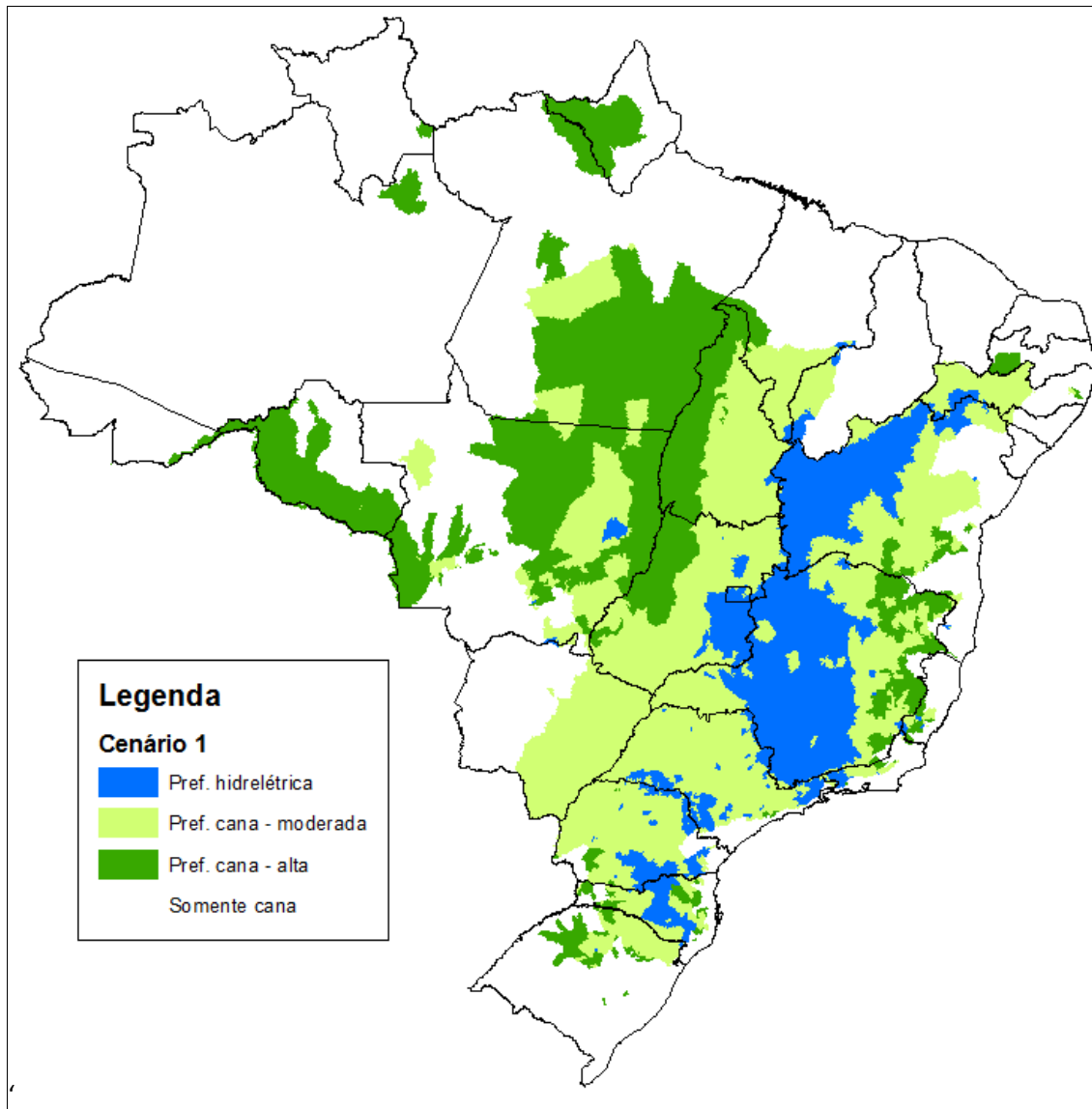


Figura 8 - Resultado da preferência hídrica para o cenário 1 (uso da cana somente para produção de etanol)

Nota-se, em análise associada a imagem abaixo, que essas áreas são praticamente coincidentes com os locais de maior altitude no país, representados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** pelas cores mais próximas do vermelho. Isto porque a produtividade acumulada das usinas depende basicamente da energia potencial, ou desnível geométrico a ser percorrido até a foz.

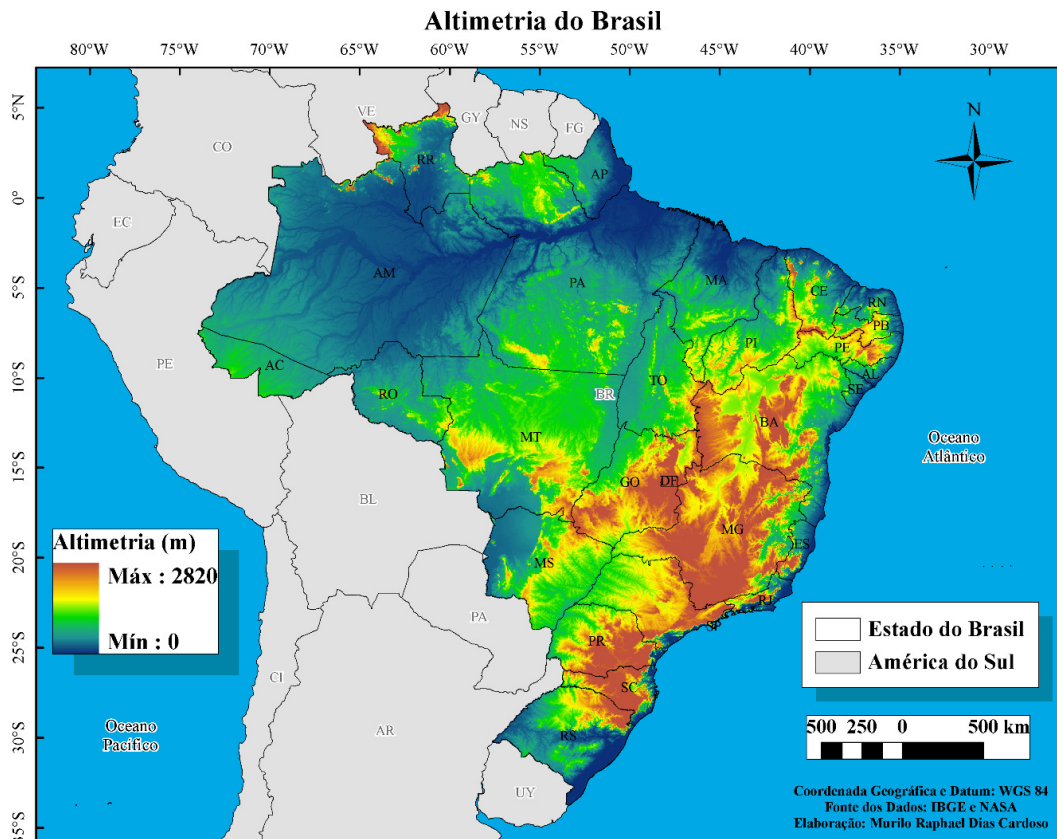


Figura 9 - Mapa Altimétrico e Político do Brasil (<http://murilocardoso.com>, 2017)

Nota-se ainda que excluído as regiões altas do país, a irrigação de cana-de-açúcar passa a ser bastante interessante, se ressaltada que a produção de etanol ainda não extrai todo o potencial energético.

Por outro lado, as áreas em verde escuro mostram regiões de alta preferência pela geração via irrigação. Tratam-se de regiões onde uma ou mais das seguintes características estão presentes:

- a) Regiões mais baixas, onde a água já possui menor energia potencial, de forma que não há conflito com geração hidrelétrica;
- b) Regiões altas, porém com poucas usinas hidrelétricas a jusante, ou estas são de baixa queda;
- c) Regiões secas, em que o ganho de produtividade obtido com a irrigação é muito alto, assegurando uma alta produtividade hídrica
- d) Regiões em que a demanda para irrigação é pequena, garantindo boa produtividade mesmo com pequeno consumo de água

As regiões com maior preferência são aquelas em branco no mapa, onde não há conflito: a vazão retirada para irrigação não deixa de gerar energia hidrelétrica, simplesmente porque não há empreendimentos hidrelétricos a jusante. Fora isso, altas preferências foram

encontradas, por exemplo, no trecho mineiro do rio Muriaé, uma vez que se trata de região próxima ao litoral, com apenas uma hidrelétrica de baixa queda a jusante (a PCH Comendador Venâncio), e uma região relativamente úmida, onde o déficit hídrico não é muito alto.

Por outro lado, as preferências mais altas para hidrelétricas (correspondentes aos valores mais baixos do indicador de preferência) foram encontradas nas cabeceiras do rio Grande (MG), que abriga uma das mais importantes cascatas hidrelétricas do país. Alta preferência por hidrelétricas também foi encontrada na região noroeste da Bahia, na bacia do São Francisco. Em ambos, o valor do indicador foi de aproximadamente 0,25, sinalizando para uma geração de energia quatro vezes maior se alocado para geração hidrelétrica.

No cenário 2, considerou-se que a cana produzida pode ser utilizada também para cogeração pela queima do bagaço, além do etanol. A Figura 10 mostra o resultado para este cenário.

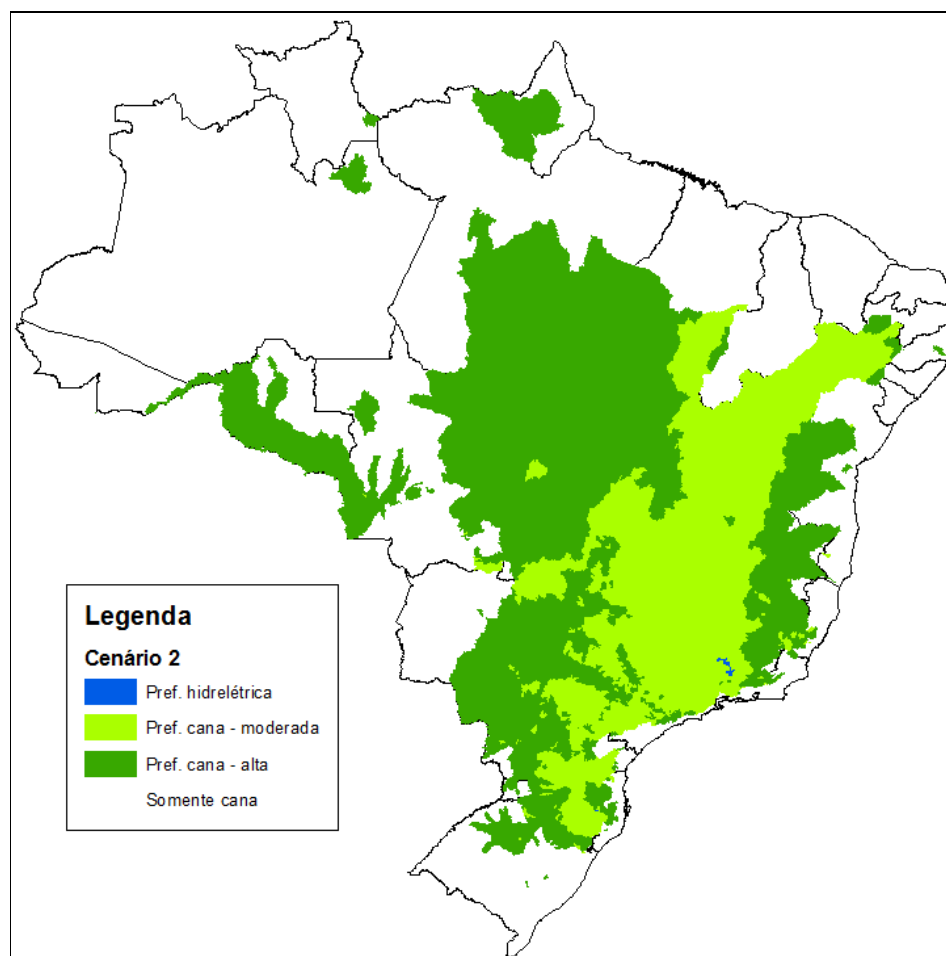


Figura 10. Resultado da preferência hídrica para o cenário 2 (uso da cana para produção de etanol e cogeração)

Observa-se que os resultados para este cenário favorecem amplamente a geração de energia via irrigação. Somente em uma pequena região nas cabeceiras do Rio Grande, o indicador de preferência foi inferior à unidade, sinalizando preferência para geração hidrelétrica. Em comparação com o cenário 1, observa-se que uma área bem maior apresenta preferência alta pela cana (produtibilidade cinco vezes superior ou mais), principalmente na bacia amazônica, nas bacias litorâneas do nordeste e na região do rio Paraná (entre MS e SP).

Mesmo as regiões que antes apresentavam preferência por hidrelétricas, como as regiões altas de Minas Gerais, passaram a apresentar preferência moderada por irrigação de cana neste cenário. Isto é explicado pelo alto calor específico da cogeração, que praticamente dobra a produtividade da irrigação.

Algumas limitações podem ser apontadas nesta análise. Em primeiro lugar, atribuiu-se uma produtividade para a cana de sequeiro constante em todo o país, igual a 65 toneladas por hectare. Essa premissa naturalmente não é verdadeira, variando em função do manejo e tecnologia adotada pelo produtor.

Entretanto, mesmo considerando manejo constante, a produtividade de sequeiro tende a variar de uma região para outra, devido à variabilidade do clima. Assim, regiões mais frias provavelmente não favorecem a produção de cana de qualquer forma, assim como regiões mais secas tendem a apresentar produtividade menor. Isso foi considerado de forma descontínua, ao atribuir-se produtividade nula às regiões situadas no semi-árido. Entretanto, a variação do clima no espaço é relativamente gradual, de maneira que essa transição abrupta não coincide com a realidade. Para regiões na transição do semi-árido, portanto, esses resultados devem ser encarados com algumas ressalvas.

Da mesma forma, regiões naturalmente úmidas tendem a ter produtividades de sequeiro um pouco mais altas do que esse valor médio. Assim, o alto valor de preferência por cana encontrado na bacia do rio Muriaé (MG) deve ser relativizado.

Como limitação adicional, menciona-se que foi arbitrada uma altura manométrica constante, o que naturalmente não é verdadeiro, variando de acordo com a topografia da área e com o dimensionamento do projeto de irrigação. Entretanto, este fator, além de ser de difícil espacialização e detalhamento, não tem muito peso no cômputo geral da produtividade da cana, visto que a produtividade resultante a ser descontada é baixa.

6. Considerações finais

No presente trabalho, foi feita uma análise comparativa da energia que pode ser extraída da água, considerando duas formas de geração: hidrelétricas e irrigação de cana-de-açúcar. Considera-se que este tipo de abordagem pode ser uma alternativa interessante na definição de prioridades de uso da água, em bacias onde há conflito entre diferentes setores, como irrigação e geração hidrelétrica. Esse tipo de conflito tende a ocorrer com mais frequência no futuro, uma vez que a produção de cana de açúcar tem se expandido a partir das áreas tradicionais no interior de SP para regiões mais novas, como Goiás, Tocantins e a região semi-árida, regiões que, por serem mais secas, tendem a exigir irrigação para obtenção de produtividades adequadas.

A metodologia resultou em dois mapas de preferência hídrica (entre hidrelétricas e irrigação de cana). Cada mapa considerou um cenário de utilização da cana; o primeiro considerou somente a produção de etanol, enquanto o segundo considerou ainda a cogeração por meio da queima do bagaço.

Da forma como foi proposta, a metodologia apontou predominância da preferência por irrigação, exceto áreas muito altas, onde a energia potencial da água na cadeia de hidrelétricas é alta. Caso seja considerada ainda a cogeração, essa predominância da preferência por irrigação aumenta, ocupando praticamente todo o país. Naturalmente, este cenário é potencial, uma vez que o percentual de usinas com co-geração ainda é relativamente baixo.

Deve-se ressaltar que há possibilidade ainda de geração pela queima da palha, a qual não foi explorada no presente trabalho.

É importante mencionar que a metodologia se ateve somente ao potencial hidroenergético de diferentes políticas de alocação do uso da água. Assim os resultados não devem ser interpretados como uma preferência absoluta da geração de energia por meio da irrigação, pois levou em conta somente uma faceta da questão. Não foram feitas considerações, por exemplo, sobre o impacto ambiental de cada alternativa. Este aspecto é particularmente sensível, visto que boa parte da região amazônica apresentou alta preferência pela irrigação. Tampouco foram considerados aspectos de caráter mais social como geração de empregos ou retorno em impostos.

Um outro aspecto a mencionar é que a análise focou somente na geração de energia, e não em outras facetas como a transmissão e a distribuição. Nessa linha, é possível que a

transmissão de energia elétrica tenda a ser mais eficiente do que o transporte de etanol por modais logísticos (principalmente rodoviário).

Como recomendações para futuros trabalhos, pode-se citar inicialmente uma melhor espacialização das produtividades de sequeiro, conforme já comentado no item anterior. Isso evitaria a transição descontínua observada no limite da região semi-árida, bem como outras pequenas inconsistências. Informações mais consistentes poderiam ser obtidas também sobre a energia específica obtida com a cogeração, uma vez que não existem muitos dados a respeito na literatura.

Outra análise complementar seria mapear um cenário adicional, levando em conta também as usinas hidrelétricas projetadas, para se ter uma idéia da evolução da preferência hídrica à medida em que o parque gerador se expande. Da mesma forma, a incorporação de um cenário levando em conta a geração por meio da queima da palha seria uma análise interessante.

Análises mais transversais poderiam ser feitas, cruzando os mapas de cenários gerados com outros planos de informação, como mapas de aptidão agrícola de solos, mapas de declividade, zoneamentos ecológicos econômico, de forma a identificar áreas mais favoráveis para a irrigação considerando múltiplos critérios.

7. Referências

- Agência Nacional de Águas (2006). *Topologia hídrica: método de construção e modelagem da base hidrográfica para suporte à gestão de Recursos hídricos – Versão 1.11*. Superintendência de Gestão da Informação, ANA.
- Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. (2002). Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Brasília.
- Aguiar, D. A., Silva, W. F., Rudorff, B. F., Sugawara, L. M., & Carvalho, M. A. (25-30 de Abril de 2009). Expansão da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo: safras 2003/2004 a 2008/2009. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE*, pp. 9-16.
- ANEEL. (24 de Agosto de 2017). *Banco de Informações de Geração - Capacidade de Geração do Brasil*. Acesso em 24 de Agosto de 2017, disponível em Agência Nacional de

Energia

Elétrica:

<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. (2013). *Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, dezembro/2012*. Brasília, DF: Conab.

CONAB. (2015). *Acompanhamento da safra brasileira – Cana de açúcar*. Fonte: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_12_17_09_03_29_boletim_cana_portugues_-_3o_lev_-_15-16.pdf

DALRI, A. B., & CRUZ, R. L. (2008). Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. *Jaboticabal*, v.28, n. 3: Engenharia Agrícola.

EMBRAPA Solos . (2009). *Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar no Brasil*. Rio de Janeiro: EMBRAPA.

FARIAS, C. H., FERNANDES, P. D., DANTAS NETO, J., & GHEYI, H. R. (2008). Em C. H. FARIAS, P. D. FERNANDES, J. DANTAS NETO, & H. R. GHEYI. *Jaboticabal: Engenharia Agrícola*, v.28, n.3.

LANNA, A. E. (25 de Junho de 2008). *A economia dos recursos hídricos: os desafios da alocação eficiente de um recurso (cada vez mais) escasso*, v. 22. Acesso em 22 de Agosto de 2017, disponível em Scielo: <http://www.scielo.br/pdf/ea/v22n63/v22n63a08.pdf>

MÉJEAN, A., & HOPE, C. (2010). Modelling the costs of energy crops: A case study of US corns and Brazilian sugar cane. *Energy Policy*, vol. 38.

Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. (2015). *Anuário Estatístico da Agroenergia de 2014*. Brasília: Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento.

Mubako, S., & Lant, C. (2008). Water resource requirement of corn-based ethanol. *Water Resources Research*, vol 44.

Nova Cana. (24 de Agosto de 2017). *Curiosidades sobre o etanol*. Acesso em 24 de Agosto de 2017, disponível em NovaCana.com: <https://www.novacana.com/etanol/curiosidades/>

Nova Cana. (24 de Agosto de 2017). *Propriedades Físico-Químicas do etanol*. Acesso em 24 de Agosto de 2017, disponível em NovaCana.com: <https://www.novacana.com/etanol/propriedades-fisico-quimicas/>

- OECD/FAO. (2016). *"Sugar"*, in *OECD-FAO Agricultural Outlook 2016-2025*. Paris: OECD Publishing. Acesso em 24 de Agosto de 2017, disponível em http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2016-9-en
- ONS. (2014). *Balanço de energia*. Acesso em 04 de Maio de 2016, disponível em Operador Nacional do Sistema: http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/DADOS2014_ONS/4_1.html
- União das Indústrias de Cana-de-Açúcar - UNICA. (27 de Abril de 2016). *UNICA Data*. Acesso em 23 de Janeiro de 2017, disponível em UNICA: <http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=81>
- Wu, M., Chiu, Y., & Demissie, Y. (2012). Quantifying the regional water footprint of biofuel production by incorporating hydrologic modeling. *Water Resources Research*, vol. 48.
- Younos, T., & Tulou, K. E. (2005). Energy needs, consumption and sources. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, nº 132, pp. 27-38.
- Younos, T., Hill, R., & Poole, H. (2012). Water Dependence of energy production and power generation systems. *Water Resources Impact*, 14.1, pp 9-12.