Estudos e Estratégias para a Utilização de Sedimentos Acumulados nos Reservatórios de Hidrelétricas de Forma a Resolver Conflitos socioambientais

Suzi Huff Theodoro[1], Rita Fonseca[2], Eduardo Rocha[3], Kleysson Rego[4], Fernando Barriga[5], Manoela Morais[6], Marco Ianniruberto[7], Íris Macedo[8], Othon Leonardos[9], Danielle Oliveira[10]

***Resumo* – O principal objetivo do Projeto foi sugerir o uso dos sedimentos acumulados no reservatório de Tucuruí/PA para fertilizar (remineralizar) ou recuperar os solos degradados ou de baixa fertilidade das áreas de entorno do Reservatório. A pesquisa envolveu vários fatores de análise, dentre os quais destacam-se o clima, a intervenção antrópica, a geologia enquadrante e o uso e ocupação do solo na área. Foram feitas análises geoquímicas, mineralógicas e de fertilidade dos sedimentos e dos solos. Os materiais selecionados para a experimentação agroflorestal foram retirados e misturados com rochas moídas (filitos e margas carbonáticas) em uma área experimental onde foram considerados os pressupostos dos Sistemas Agroflorestais. Os resultados demonstraram a viabilidade agronômica/produtiva da mistura sedimentos/ rocha, o que os credencia como potenciais fertilizantes para os latossolos da região. Além disto, a retirada dos sedimentos trará benefícios à geração de energia, uma vez que a vida útil do reservatório poderá ser prolongada.**

***Palavras-chave*: Remineralização, Reservatório, sedimentos e sistema agroflorestal**

I. Introdução

O reservatório de Tucuruí é englobado em sua totalidade por uma Área de Proteção Ambiental, instituída em 2002, com 568.667 hectares. No entorno do Reservatório estão localizados oito municípios (Jacundá, Novo Repartimento, Itupiranga, Nova Ipixuna, Tucuruí, Marabá, Goianésia do Pará e Breu Branco) que compõem uma área fortemente influenciada pela dinâmica da UHE de Tucuruí. Anteriormente a implantação do Reservatório a maior parte da região era formada pela floresta Amazônica. O estudo e a análise documental da bacia de contribuição do Reservatório de Tucuruí/PA mostrou que os rios Tocantins e Araguaia são os maiores responsáveis pela carga de sedimentos que chega ao Reservatório. Esta Bacia abrange os estados de Goiás, Tocantins, Pará, Maranhão, Mato Grosso e o Distrito Federal (Figura 1). Cerca de 7,9 milhões de pessoas vivem na região hidrográfica (4,7% da população nacional), sendo 72% em áreas urbanas. [1].

Considerando tais indicadores, o principal objetivo deste Projeto foi estudar os sedimentos acumulados no reservatório de Tucuruí/PA, de modo a propor o seu uso para remineralizar ou recuperar os solos degradados e de baixa fertilidade das áreas de entorno do Reservatório. Devido ao caráter interdisciplinar do Projeto, os procedimentos metodológicos utilizados foram variados e serão descritos nas diferentes fases e atividades. Os resultados das várias etapas e atividades mostraram que os sedimentos retidos no reservatório têm um grande potencial para reverter os baixos índices de fertilidade dos solos da região do entorno, uma vez que do ponto de vista geoquímico mostram-se com concentrações superiores aos solos da região amazônica. Os resultados relativos ao SAF mostraram-se positivos, uma vez que as principais espécies de plantas apresentaram índices de crescimento positivos.

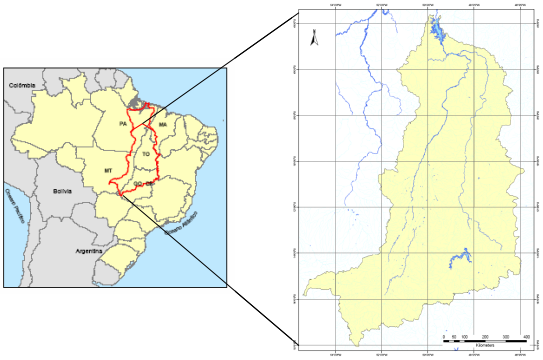


Figura 1. Localização da bacia de contribuição do reservatório da usina de Tucuruí.

II Área De Influência Do Reservatório De Tucuruí

A região de influência do reservatório vem sofrendo forte grau de antropização (o que provocou a re-locação de populações ribeirinhas e indígenas), um alto grau de urbanização e o agravamento dos problemas de saúde pública. Esta região é considerada de difícil análise a partir de dados de sensoriamento remoto por apresentar um padrão de ocupação da terra de "espinha de peixe", onde um grande número de pequenas propriedades encontra-se distribuído ao longo de estradas [2]. As informações referentes à geologia da área de influência do reservatório de Tucuruí foram obtidas das folhas da Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, produzida pela CPRM, em escala 1:1.000.000, e às referentes aos solos foram obtidas do mapa de solos do Consórcio Engevix-Themag, em escala 1:250.000.

Semelhante ao que ocorre em toda a área de influência do reservatório, também na área do entorno, as formações geológicas apresentam uma ampla diversificação do ponto de vista de idade, gênese e processos de deformação e alterações posteriores. Estão presentes três grandes

---

[1]Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

Pesquisadores 1, 3, 4, 7, 8, 9, 10 vinculados à UnB suzitheodoro@unb.br (correspondente) e pesquisadores 2, 5 e 6 vinculados à Universidades de Évora e Lisboa rfonseca@uevora.pt (correspondente)

entidades geológicas denominadas Cráton Amazônico, Cinturão Araguaia e Bacia do Parnaíba [3]. Mais recentemente, e a partir do trabalho da CPRM, a geologia da região vem sendo reinterpretada. A literatura mais recente [4], mostra que os terrenos à esquerda do Rio Tocantins, anteriormente referenciadas como Complexo Xingu, estão divididos em 4 unidades: (i) **A3PP2ca** - Enderbito Cajazeiras: charnockito (granito com hiperstênio), enderbito (tonalito com hiperstênio), kinzigito (gnaisse aluminoso); (ii) **A3PP2d** - Suíte Granulítica Direita (granulito e milonito); (iii) **PP2va** - Complexo Valentim (granitos e gnaisses) e (iv) **PP1j** - Complexo Jacaré (granitos). Na região da barragem, destaca-se, dentro do Grupo Tocantins, um pacote de derrames basálticos, levemente metamorfisados, sotopostos a metassedimentos grauvaquianos, constituindo uma unidade denominada Formação Tucuruí. As coberturas fanerozóicas da Bacia do Parnaíba desenvolveram-se a partir do Siluriano e, esta sedimentação, resultou, entre outras, nas Formações Codó e Itapecuru e Barreiras, constituídas por arenitos e argilitos de idade cretácea. No Terciário, houve deposição de arenitos, siltitos e argilitos continentais que constituem a Formação Barreiras, quando se iniciou o processo de laterização dos solos submetidos às condições climáticas específicas.

Qualquer um destes materiais geológicos resultou de processos contínuos e alteração da crosta terrestre. Ao longo de tais processos ocorreram complexos mecanismos de transformação física, química e mineralógica, os quais, em uma primeira fase, desagregam as rochas favorecendo a concentração e a disponibilidade de determinados nutrientes que estarão presentes nos solos. A partir do conhecimento da conformação geológica, associada a dados de pedologia e geomorfologia foi possível inferir o tipo de sedimentos que se encontram no Reservatório.

O estudo partiu do pressuposto de que rochas moídas ou seus derivados (sedimentos) podem efetivamente recuperar os níveis de fertilidade dos solos. Tal pressuposto baseia-se nos princípios da técnica de rochagem que em sua essência prevê que determinados tipos de rocha podem melhorar as condições de fertilidade dos solos, sem afetar o equilíbrio do meio ambiente [5] e [6]. De modo geral, as rochas utilizadas devem ser fontes naturais de fósforo, potássio, cálcio e magnésio, além de uma série de micronutrientes indispensáveis à nutrição vegetal. Além disso, o uso de pós de rochas facilita o equilíbrio entre os diferentes elementos que compõem os agroecossistemas [7], [8] e [9].

O uso de sedimentos como rejuvenescedores de solos partiu dos estudos desenvolvidos por [10], [11] e [12] que mostram que os sedimentos acumulados em reservatórios, são potencialmente favoráveis para o uso agrícola, porque os mesmos representam o somatório de vastas extensões de áreas geologicamente diversas.

III. Caracterização das Rochas, dos Sedimentos e dos Solos

Para caracterizar os sedimentos do reservatório foi feita uma malha de amostragem (20 pontos distribuídos ao longo do Reservatório), em duas campanhas de amostragem (período úmido e seco) em 2006 (Figura 02). Os sedimentos foram estudados com base em análises químicas e físicas usadas como rotina na avaliação da fertilidade de um solo, tais como: análise textural, teor de matéria orgânica, pH, nitrogênio, teor de macronutrientes (P, K, Ca, Mg) e micronutrientes metálicos (Fe, Mn, Zn, Cu) assimiláveis, capacidade de troca catiônica, doseamento de bases de troca e capacidade de retenção de água (capacidade de campo). Além disto, foram feitas análises de química total nas amostras coletadas nos dois períodos de amostragem, a fim de se conhecer a composição total de tais materiais, sob diferentes condições de pH.

De forma a se obter uma caracterização química e física mais completa dos sedimentos e dos solos do entorno, foi feita a identificação, caracterização e semi-quantificação dos minerais argilosos e a análise pormenorizada da distribuição granulométrica das frações siltico-argilosa e arenosa.

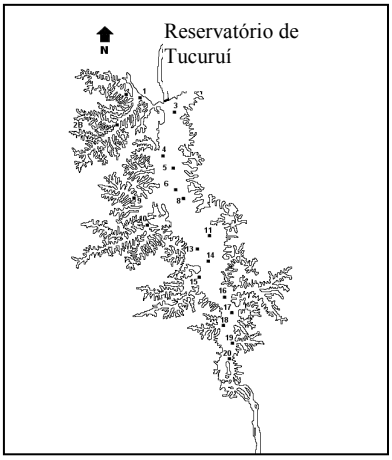


Figura 02 - Localização dos pontos de coleta dos sedimentos

Os sedimentos e solos foram analisados por meio de uma combinação de métodos de plasma indutivamente acoplado, análise de ativação neutrônica e espectrometria de massa. Elas demonstram um surpreendente enriquecimento de até um grau de magnitude nos macronutrientes como cálcio, magnésio, potássio, fósforo e enxofre e micronutrientes como boro, cromo, cobre e cobalto nos sedimentos retidos no reservatório, quando comparados com os solos lateríticos da região de entorno, ou mesmo de outros solos da região Amazônica, que são intensamente empobrecidos em relação às rochas matrizes ou à composição média da crosta.

Na área de entorno do reservatório predominam duas classes: os Podzólicos e os Latossolos. São solos minerais ácidos, de fertilidade natural muito baixa em conseqüência de sua significativa pobreza química, especialmente na margem direita (leste), onde tais solos são derivados de rochas metassedimentares (siltitos e argilitos), das formações Codó, Itapecurú e Barreiras. De modo geral, os solos de ambas os lados do Reservatório apresentam horizontes com textura variável de arenosa até muito argilosa. O conteúdo de matéria orgânica ocorre de forma concentrada superficialmente. Freqüentemente exibem níveis de concreções ferruginosas em diferentes profundidades do perfil. Tais características indicam que o uso agrossilvopastoril destes solos é bastante limitado.

A fertilidade dos solos, nas áreas a serem recuperadas para uso agrícola ou florestal, poderá ser incrementada com os sedimentos mais a adição de pó de rocha, disponível nas pedreiras de margas, filitos carbonáticos e calcários impuros presentes na região da barragem, como forma de aumentar os valores de cálcio, magnésio e fósforo e, também, do pH. Além do incremento mineral, a mistura formada por sedimentos e rochas moídas melhora as características

físicas dos solos e, em especial, a sua permo-porosidade. Pode-se, portanto, sugerir que tais misturas comportam-se como fertilizantes inteligentes, de baixa dissolução ou *slow-release.*

A caracterização de algumas rochas disponíveis na região revelou que os filitos e margas carbonáticas são adequados para a formação do "mix" com os sedimentos. Neste sentido, facilita o fato de que tais rochas encontram-se moídas e formando uma grande pilha de rejeitos, em uma pedreira da Camargo Correa, que está instalada na área da UHE. Os filitos são compostos por carbonatos (40%), epidotos (25%), e quartzo com 20%. Os demais minerais que compõem a matriz mícritica são plagioclásios, hornblendas, biotitas, micas, augitas e K-feldspato. Tal composição demonstra que os minerais formadores destas rochas prestam-se perfeitamente ao uso agrícola, segundo os preceitos da rochagem, pois podem conter quantidades apreciáveis de Ca, Mg, P e muitos micronutrientes. Para confirmar a viabilidade do uso destas rochas como fontes de nutrientes foram efetuadas análises para os teores totais de CaO, MgO, P_2O_5, K_2O, Fe, Si, Resíduo total e Resíduo insolúvel. O método utilizado foi o ICP. O resultado destas análises revelou porcentagens significativas de CaO (1,96%), MgO (1,53%), P_2O_5 (0,22%), K_2O (0,32%) e Fe_2O_3 (4,19%). O resíduo considerado insolúvel para o ataque de HCL a 5% resultou em 83%. Deve ser considerado que as amostras não foram moídas e que o método de análise é o mesmo que é utilizado para solos.

A sistematização dos dados geoquímicos dos sedimentos, via a construção dos diagramas de correlação e entre os diferentes elementos considerou também os dados relativos às análises dos solos coletados na região do entorno. Para apresentar um contexto mais regional, foram acrescentados alguns parâmetros descritos no trabalho de Kronberg, 1979 [13]. Os diagramas permitiram uma visão comparativa do enriquecimento e/ou empobrecimento relativo entre solos da Amazônia, dos solos da região do entorno e dos sedimentos retidos no reservatório de Tucuruí nos dois períodos de amostragens. A Figura 3 mostra os resultados para os três principais componentes minerais presentes nos sedimentos argilosos acumulados no Reservatório. A sílica (quartzo) mostra uma clara tendência de concentração em direção à montante, enquanto o alumínio e ferro apresentam um leve enriquecimento em direção à jusante. A sílica e o alumínio são dois elementos com grande influência na sedimentação do Reservatório, apesar de mostrarem correlação distinta, indicando, conforme os autores, origens distintas [11].

O Ferro apresenta um comportamento pouco uniforme, com variações significativas nos diferentes pontos. No entanto, é possível verificar que ocorre uma certa tendência de se encontrar menores porcentagens em direção à montante (próximo da entrada do reservatório). O P_2O_5 tem um comportamento muito similar ao Fe_2O_3, mostrando concentrações maiores à medida que os sedimentos distanciam-se do principal ponto de contribuição de águas e sedimentos no Reservatório. Este comportamento pode estar indicando que a maior parte do Fósforo encontrado nas amostras deve estar fazendo parte da estrutura cristalina das argilas mais ricas em Ferro e, secundariamente, em Al_2O_3.

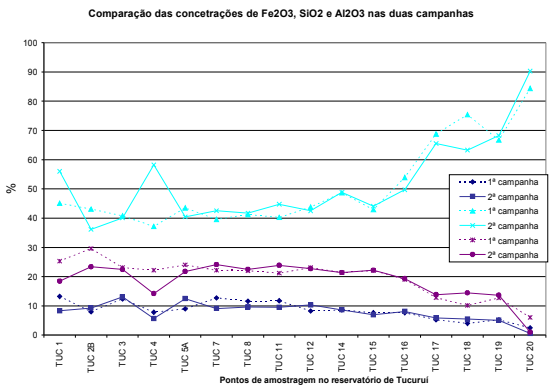


Figura 3 - Diagrama mostrando as variações das concentrações (%) de SiO_2, Fe_2O_3 e Al_2O_3 nos dois períodos de amostragem.

A figura 4 mostra o comportamento do K_2O, CaO e MgO. O Potássio, que também é um componente fundamental em solos férteis, mostra um comportamento relativamente uniforme nas duas campanhas de coleta. Porém, as amostras que se encontram mais próximas da antiga calha do Rio Tocantins (onde ocorrem as maiores espessuras de lâmina de água), aparecem mais enriquecidas neste nutriente.

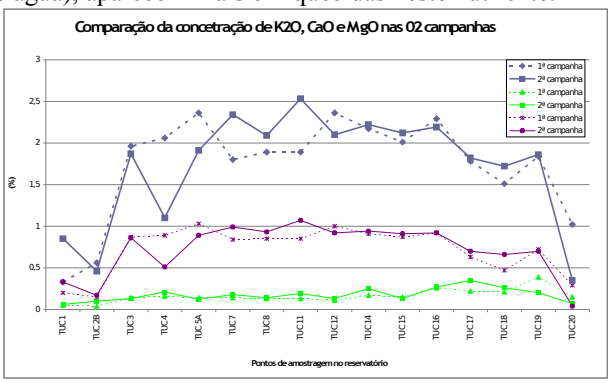


Figure 4 – Diagrama mostrando a concentração (%) de K_2O, CaO e MgO nos dois períodos de coleta dos sedimentos.

Considerando que o potássio resulta do intemperismo em feldspatos e micas, pode-se inferir que a presença deste nutriente nos sedimentos deva-se às rochas vulcânicas, que ocorrem próximo ao município de Marabá. O Cálcio, tal como o Magnésio, apresenta uma alta mobilidade geoquímica, sendo facilmente lixiviado.

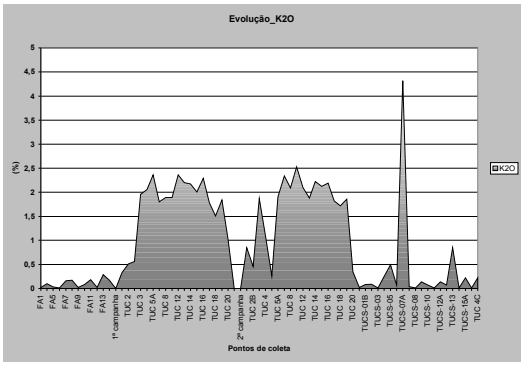
Este comportamento fica claro no gráfico, uma vez que é possível verificar a maior concentração em direção à montante do Reservatório, especialmente na primeira campanha, quando o mesmo estava sendo abastecido por uma maior quantidade de água/sedimentos, sugerindo, com isto, uma maior abrangência de áreas de drenagens. Considerando a solubilidade deste elemento, pode-se supor que o Cálcio, assim como o Magnésio, compõem a estrutura cristalina de minerais que são facilmente alterados pelo ambiente mais oxidante, sendo então removidos e transportados pela coluna de água.

A partir dos resultados mostrados nos diagramas, é possível perceber que os elementos mais facilmente solubilizados (Ca, Mg e K) encontram-se com concentrações muito baixas na maior parte dos pontos amostrados, evidenciando que a área de drenagem que alimenta o Reservatório de Tucuruí é bastante intemperizada e já empobrecida nestes nutrientes. A presença marcante dos

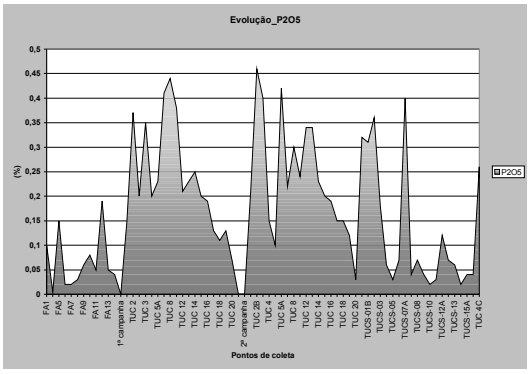
óxidos de Silício, Ferro e Alumínio reforça esta característica, denotando solos lateríticos bastante lixiviados, característicos de regiões tropicais. A exceção é o Fósforo, que apresenta uma concentração mais acentuada nas partes mais distantes da principal zona de aporte de água/sedimentos no reservatório, tal como ocorre com o Ferro e Alumínio. Esta característica parece estar indicando que as maiores concentrações de Fósforo estão relacionadas à presença destes dois elementos, que são sabidamente mais imóveis. A correlação mais forte é com o Ferro, indicando que estes dois elementos podem estar compondo a estrutura cristalina das mesmas argilas. É importante lembrar que o fato de tais sedimentos possuírem uma quantidade apreciável de matéria orgânica (alcançando até 20% nas amostras analisadas), o potencial de fertilidade do material torna-se ainda mais efetivo. Para reforçar esta aptidão serão apresentados, a seguir, alguns diagramas que comparam as concentrações desses mesmos óxidos (P_2O_5, K_2O, CaO e MgO) com os solos do entorno e alguns solos da região amazônica. As amostras dos diagramas (Fa) - representam as concentrações dos solos amazônicos [13]. O grupo de amostras plotadas na seqüência (TUC) representa as concentrações dos sedimentos coletados na primeira campanha (cota máxima). A seguir, aparece o grupo de amostras coletadas nos mesmos pontos do Reservatório, porém em um período de cota mínima. Na seqüência são plotados os pontos relativos às amostras de solos da região do entorno do Reservatório (com denominação TUCs).

O Fósforo (Figura 5a) apresenta concentrações mais elevadas nos sedimentos do que nos solos do entorno e da Amazônia. Este fato aponta para um efeito positivo da adição dos sedimentos aos solos. O Potássio (Figura 5b) é o elemento que apresenta a mais marcante diferença em relação aos dois grupos de solos. Tal característica confere aos sedimentos a categoria de potencial insumo para aumentar a fertilidade dos solos do entorno, mesmo quando se considera a sua baixa concentração.

Da mesma forma, as concentrações de Potássio, Cálcio e Magnésio encontradas nos sedimentos são bem superiores àquelas encontradas nos dois grupos de solos (figuras 6(a) e 6(b)). Tal característica reforça a tese de que a aplicação destes sedimentos poderá favorecer uma mudança positiva nos solos, em termos de fertilidade. Ainda que as concentrações sejam muito baixas, a disponibilização de um material mais enriquecido nestes elementos, trará um benefício positivo para os solos da região do entorno do reservatório.

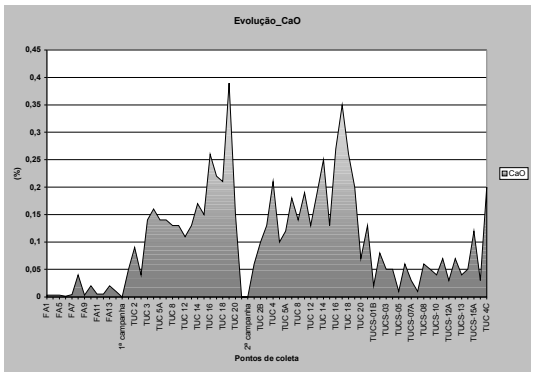


(a) P_2O_5

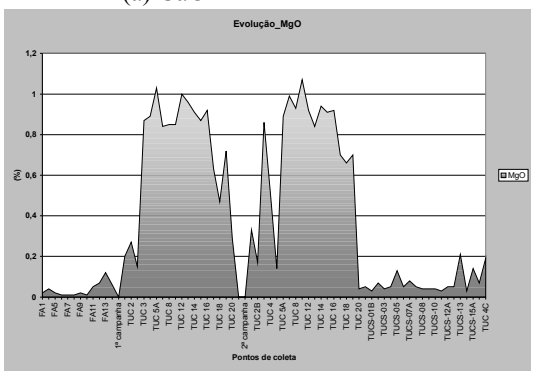


(b) K_2O

Figura 5 - Diagrama mostrando a comparação de concentração (em %) da P_2O_5 (a) e K_2O (b) em solos da Amazônia, sedimentos retidos no reservatório (em dois momentos) e nos solos da região do entorno do reservatório de Tucuruí.



(a) CaO



(b) MgO

Figura 6 - Diagrama mostrando a comparação de concentração (em %) da CaO (a) e MgO (b) em solos da Amazônia, sedimentos retidos no reservatório (em dois momentos) e nos solos da região do entorno do reservatório de Tucuruí.

A partir dos dados mostrados nos diagramas é possível verificar que ocorre uma correlação positiva dos principais nutrientes utilizados para o pleno desenvolvimento das plantas nos sedimentos estudados. Assim, os quatro principais macronutrientes (Ca, Mg, K e P) aparecem com concentrações mais expressivas nos sedimentos do que nos solos, o que permite supor que eles trarão um benefício aos solos. Considerando ainda que os sedimentos apresentam grandes quantidades de matéria orgânica, os resultados tendem a serem ainda melhores.

Os micronutrientes também mostram concentrações relativas mais altas nos sedimentos. Foi possível verificar que o Boro e o Cobalto apresentam concentrações significativamente superiores, quando se comparam os níveis de concentração destes micronutrientes nos dois grupos de solos (Amazônia e do entorno do Reservatório).

Os demais elementos, tais como Co, Cu e Zn, apresentam valores semelhantes àqueles encontrados na média da crosta. Porém, quando se comparam às concentrações destes micronutrientes nos sedimentos e nos solos, é possível verificar que eles representam valores levemente superiores, em média, aos valores encontrados nos dois grupos de solos considerados.

As análises de fertilidade efetuadas no sedimentos e nos solos revelaram teores de fertilidade de média a boa. Para determinação de fósforo, potássio, ferro, cobre, manganês e zinco disponível em MEHLICH I, foi utilizada solução extratora - MEHLICH I: HCL 0,05*M* + H_2SO_4 0,0125*M*.

O pH (em água) das amostras variou de ácido (4,0) a fracamente ácido (6,4). No que se refere à quantidade de matéria orgânica, que foi determinada pelo método calorimétrico, as amostras apresentam quantidades consideráveis (11,4% a 1,9%). Tal como foi visto na análise de química total, também este procedimento analítico comprovou a presença expressiva de matéria orgânica. A quantidade de elementos disponíveis especialmente P e K, mostrou-se variável (31,1 a 5,2 mg/dm^3).

A concentração de fósforo disponível na amostra TUC 04 é bastante superior àquela encontrada na análise de química total. Este fato pode ser explicado pela grande quantidade de matéria orgânica que também contém fósforo disponível. O potássio disponível também se mostrou variável (108 a 14,1 mg/dm^3). Contrariamente ao comportamento do fósforo, que parece estar sendo enriquecido, o potássio mostrou que as quantidades relativamente altas constatadas nas análises de química total não se repetem quando se considera a sua pronta disponibilidade, que é vista pelas análises de fertilidade. O fato de se encontrar quantidades pouco significativas de K^+ disponível confirma a alta solubilidade deste elemento e, possivelmente, a sua rápida remoção dos sedimentos para a coluna de água. O cálcio apresentou concentrações da ordem de 8,5 a 2,0 cmol$_c$/dm^3 e o magnésio, valores de 0,0 a 3,4 cmol$_c$/dm^3, mostrando uma razoável variação de distribuição, porém superiores aos valores encontrados nas amostras de solo.

De posse destes dados, os minerais argilosos foram analisados na fração argilosa (<2 µm) através de difração de raios-X, com utilização de um *difractometro Bruker* AXS D8 *Advance*, com *slit* automático sob as condições de radiação Cu-Kα a 40 kV, 30 mA. Os difratogramas foram registrados no intervalo 2-50º2θ, cada registro com o intervalo de 0,020 º2θ. A identificação, caracterização e semi-quantificação foram baseadas em métodos desenvolvidos por [11].

Mesmo considerando (1) a grande diversidade litológica da bacia de alimentação; (2) os diversos estados de alteração dos produtos de intemperismo e; (3) a mistura desses produtos decorrente das fases de transporte e sedimentação, a elevada taxa de intemperismo das rochas e solos, poderá explicar a baixa diversidade de minerais argilosos, devido à intensa lixiviação de elementos solúveis como Ca, Na, K e Mg e, também, devido à acumulação preferencial de elementos estáveis (Si, Al, Fe), típica do clima tropical úmido. Estes são principalmente representados por caulinita, seguida, em menores proporções por ilita, o que denota uma elevada evolução mineralógica. Clorita degradada, com interestratificações instáveis de folhetos ilíticos não ocorre em todos os sedimentos, mas quando ocorre, apresenta baixos teores (< 10%).

No setor Sul do Reservatório (Figura 7), ocorrem pequenas concentrações de esmectita, o que aponta a sua proveniência a partir das rochas básicas da Formação Tucuruí. Estes dois minerais (clorita e esmectita) são os mais ativos física e quimicamente na retenção, fixação e liberação de nutrientes para a coluna de água ou para as plantas, no caso dos sedimentos serem utilizados para fins agrícolas.

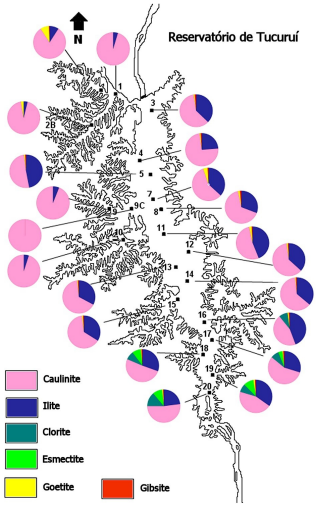


Figura 7 – Distribuição dos diferentes tipos de argila

IV. Qualidade da Água do Reservatório

Ao mesmo tempo em que foram coletados e analisados os sedimentos e solos, a água também foi analisada sob diversos aspectos (14 pontos). Este estudo revelou que nas duas campanhas de amostragem a água não se apresenta estratificada, o que indica uma boa mistura das diferentes camadas verticais. Todavia, no período seco, nos pontos com maior profundidade, a partir dos 28 m, o ambiente é anóxico, com valores de oxigênio muito reduzidos a que corresponde um potencial redox negativo. Nestas condições, apenas ocorrem processos de sedimentação, não se dando decomposição da matéria orgânica de fundo. É interessante verificar que longitudinalmente, sobretudo no período de depressionamento, os pontos mais a montante (pontos 18 e 20) apresentavam temperaturas mais frias com maior concentração de sólidos suspensos totais, essencialmente de composição mineral, fato que indica características da água afluente proveniente do rio Tocantins. Em termos de concentração de nutrientes (nitrogênio, nas suas diferentes formas, e Fósforo), que poderão dar uma indicação do estado de eutrofia do sistema, verifica-se que as concentrações são baixas, encontrando-se inferiores ao limite que define os sistemas como eutrófico (35 mg/L para o fósforo Total).

Comparando as duas campanhas, constata-se que os Nitratos e o nitrogênio Amoniacal são tendencialmente mais elevados no período úmido. Tal fato deve-se, provavelmente, a uma entrada de água proveniente da bacia de drenagem, via águas recentemente aportadas ao reservatório por efeito da precipitação intensa verificada nesta época do ano. Contrariamente, as concentrações de Fósforo Total e de Fósforo reativo dissolvido apresentam-se inferiores no período úmido, o que poderá estar relacionado com o seu elevado consumo por parte dos produtores primários à superfície e à ausência de libertação do substrato. No período

seco, os teores de Fósforo total e de Fósforo reativo dissolvido são superiores aos valores obtidos no período úmido, o que, provavelmente, relaciona-se com a diminuição da biomassa algal e, conseqüente, menor consumo de fósforo com maior disponibilidade de fósforo na água.

Relativamente aos metais, há que se mencionar, sobretudo, as concentrações mais elevadas de Ferro e de Manganês no fundo. Fato esperado, uma vez que as formas solúveis destes dois elementos (Fe^{+2} e Mn^{+2}) e a sua libertação do substrato ocorrem em situações de anoxia com potencial redox negativo. Os parâmetros de mineralização analisados (cloretos, cálcio e alcalinidade) são baixos sem apresentarem um padrão específico de variação, quer espacial, quer temporal. Reflete-se assim o baixo índice de mineralização da água, o que está em consonância com os baixos valores de condutividade observados.

Por último, e relativamente às concentrações de clorofila *a* (indicador de biomassa algal), de um modo geral, os pontos amostrados evidenciam uma concentração inferior ao limite mínimo a partir do qual um sistema é classificado como eutrófico (8 μg/L). De modo geral, pode-se dizer que a água apresenta qualidade ecológica em termos de sustentabilidade do sistema. Todavia como futuras direções de investigação, salienta-se que a perspectiva de ligação entre a bacia de drenagem e a massa de água é fundamental para o entendimento dos complexos fenômenos de correntes no reservatório.

V. Erosão e Estudo das Áreas Prioritárias para Recuperação no Entorno do Reservatório

A erosão constitui o início dos problemas derivados dos sedimentos no meio ambiente. Por isso, o conhecimento dos processos erosivos que ocorrem na bacia de contribuição de um reservatório, ou em parte dela, é fundamental para o entendimento dos fenômenos de geração e movimento dos sedimentos na bacia ou no trecho que está sendo estudado [14]. Para a caracterização dos fenômenos de erosão é necessário o conhecimento dos principais atributos da bacia que intervêm na dinâmica dos processos erosivos, tais como tipo e cobertura do solo, geologia, geomorfologia, topografia, regimes de precipitação e as práticas conservacionistas adotadas pelo homem.

Pode-se dizer que a erosão hídrica é um dos problemas mais sérios dos solos de regiões tropicais, especialmente nos casos onde as áreas são utilizadas para a produção agropecuária convencional, que necessita, para sua reprodução em escala, a retirada completa da cobertura vegetal. Este tipo de prática acaba reduzindo a capacidade produtiva do solo, devido ao transporte ou carreamento dos sedimentos, nutrientes e agroquímicos, causando problemas na qualidade e disponibilidade da água [15].

Dentro dessa concepção, é importante que haja um nstrumento que possa oferecer subsídios às decisões sobre planejamento do uso da terra, tanto no âmbito regional como no local. Com esse propósito, a utilização de modelos de previsão de perda de solo pode ajudar, fornecendo previsões para os diferentes usos.

Nesta pesquisa este tema foi um dos objetos de análise, uma vez que a erosão é um fator decisivo para o desenvolvimento sustentável da APA que circunda o Reservatório, bem como para as comunidades que vivem no seu entorno. Para tal fim, foram levantados dados relacionados aos meios físico e antrópico, por meio da obtenção de diferentes produtos cartográficos e visitas de campo. Em seguida, foram utilizados três modelos de previsão de erosão. Para a identificação das áreas com suscetibilidade à erosão laminar foram utilizados: o modelo qualitativo apresentado por [16] e a Equação Universal de Perda de Solos (EUPS), apresentada por [17]. Já para a identificação das áreas com suscetibilidade à erosão linear utilizou-se o modelo qualitativo desenvolvido por [18].

A partir das informações obtidas no levantamento preliminar e nas visitas de campo foi feito um estudo específico para a erosão Laminar e Linear, indicando as fragilidades, áreas mais sensíveis, para, a partir de alguns pressupostos, elencar medidas mitigadoras. Este estudo chegou às seguintes conclusões: (i) a região de influência do reservatório de Tucuruí apresenta baixo potencial atual à erosão laminar em 74,8% da área, que ocorre devido principalmente à existência de algumas áreas de preservação e/ou de vegetação nativa ainda intacta. As áreas de médio e alto potencial ocorrem em 25,2% e estão localizadas muito próximas do reservatório, podendo contribuir para o seu assoreamento. A qualidade dos solos de áreas agrícolas localizadas nestas áreas ainda pode ser comprometida pela perda da camada fértil de solo e; (ii) Com relação à erosão linear, foi possível observar que as classes I (baixa) e II (média baixa) representam 90,3% da área de estudo. Isto pode ser justificado pelo fato da maior parte da área estar localizada em uma região com rochas caracterizadas como de baixo potencial à erosão linear. No entanto, nas classes III (média alta) e IV (alta), que representam 9,7% do total, foram observadas feições lineares significativas, que sem o adequado controle podem provocar sérios danos às estradas e às outras obras de infra-estrutura localizadas próximas às mesmas. Tais feições podem ainda evoluir para voçorocas de grande porte, produzindo uma grande quantidade de sedimentos na área.

Os resultados obtidos dos estudos de erosão realizados na área de influência do reservatório serviram de base para a identificação das áreas prioritárias para a tomada de medidas de uso sustentável.

Os procedimentos adotados para a identificação das áreas prioritárias que podem ser passíveis de ações de recuperação utilizando, por exemplo, os resultados alcançados nos experimentos na Unidade Experimental com sistema agroflorestal consistiram na análise dos diferentes condicionantes físicos e socioeconômicos, potenciais causadores de interferências no reservatório. A Figura 8 apresenta uma esquematização dos procedimentos metodológicos utilizados nesta pesquisa para indicar as áreas com maior fragilidade.

Utilizando esta metodologia e vários dados secundários foram identificados um total de 37 áreas com alto potencial erosivo ou prioritárias para intervenção. Para tanto elencou-se três critérios: (i) Distância das áreas passíveis de recuperação ao reservatório e ao rio Tocantins; (ii) Distância das áreas passíveis de recuperação aos centros urbanos e à estrada de terra principal que margeia o reservatório e (iii) Distância das áreas passíveis de recuperação às feições erosivas lineares identificadas no campo. O somatório dos dados permitiu a elaboração de um mapa com cinco áreas prioritárias para recuperação. (Figura 09)

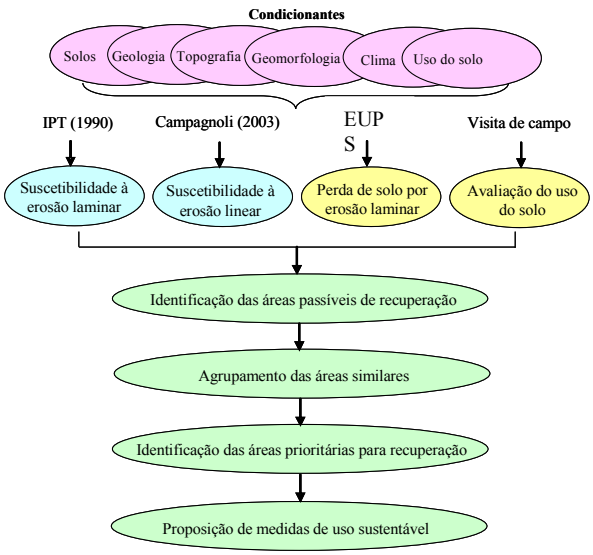


Figura 8. Procedimentos metodológicos utilizados para a seleção das áreas prioritárias para a proposição de medidas de uso sustentável.

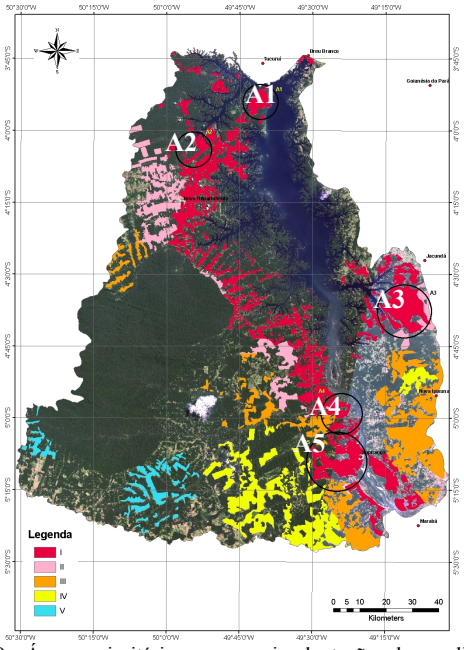


Figura 9. Áreas prioritárias para a implantação de medidas de uso sustentável.

A seguir é apresentada uma breve discussão acerca de cada área selecionada. Nas cinco áreas o uso do solo é caracterizado pela existência de atividades agrossilvopastoris e focos de solo exposto

Área 1 (51,8 km²): A área está situada em uma das regiões mais altas do entorno do reservatório (altitudes em torno de 300m) com declividades que variam entre 0 e 30%. Ocorrem predominantemente solos latossólicos vermelho-amarelo, com uma pequena faixa de podzólicos vermelho-amarelo localizada no limite com o corpo do reservatório. Por sua proximidade com a barragem, os sedimentos gerados na Área 1 podem contribuir para o assoreamento do reservatório, além de causar o entupimento das turbinas e das estruturas hidráulicas da barragem, comprometendo a capacidade de geração da usina. Sugere-se que essa área seja utilizada para fins de proteção ambiental e não como geradora de recursos econômicos. Deverá ser realizado um reflorestamento, com a recomposição da mata ciliar. O uso da mistura de sedimentos e rochas para recuperar os índices de fertilidade, bem como melhorar a estrutura física do solo, pode funcionar perfeitamente para esta área, uma vez que os sedimentos acumulados no reservatório, próximo desta área, se revelaram como adequados do ponto de vista geoquímico. Como a região apresenta altas taxas de declividade, o plantio de Sistemas Agroflorestais e de bosques energéticos deve ser realizado em curvas de nível para evitar a ocorrência de erosão.

Área 2 (30,8 km²): As declividades variam entre 0 e 30%. Ocorrem solos podzólicos vermelho-amarelo. A área se encontra na entrada de um dos braços superiores esquerdos do Reservatório, onde há uma grande quantidade de pequenos cursos d'água que drenam em direção ao Lago, o que facilita a entrada de sedimentos. Nesta área, semelhante ao que ocorre na Área 1, sugere-se a recomposição de matas ciliares na altura da cota máxima, que pode funcionar como um filtro ou barreira florestal, de modo que impeça a chegada dos sedimentos no reservatório.

Área 3 (197,2 km²): As declividades não são muito altas e variam entre 0 e 15%. Ocorrem solos podzólicos vermelho-amarelos. A área se encontra na entrada do maior braço inferior direito do reservatório. Considerando que esta área vem sendo utilizada para assentamentos rurais, sugere-se que se faça um zoneamento para se verificar a aptidão dos solos e o perfil dos agricultores assentados. É possível que atividades relacionadas a policultivos, possam trazer efeitos benéficos, em um curto espaço de tempo. O uso de policultivos é indicado especialmente para áreas com baixas taxas de fertilidade, uma vez que as formas de manejo são diversificadas para cada cultura ou espécies florestais que se deseje incorporar no sistema.

Área 4 (165,3 km²): As declividades variam entre 0 e 30%. Ocorrem solos podzólicos vermelho-amarelo de textura argilosa e média. A área se encontra localizada na margem esquerda do rio Tocantins em um trecho em que o rio apresenta uma grande sinuosidade e onde são observadas várias ilhas, formadas, provavelmente, em virtude das condições topográficas e geológicas do local. No entanto, a redução da energia de transporte nos trechos meândricos do rio favorece a formação de depósitos aluvionares, provenientes dos sedimentos gerados pela erosão, que efetivamente podem se juntar às ilhas existentes, formando um barramento natural de sedimentos de granulometria mais grosseira. Dentre todas as áreas selecionadas, esta, possivelmente, é a mais estratégica para a manutenção da vida útil do reservatório, uma vez que sua preservação pode garantir o fluxo hídrico do sistema. Neste caso específico, sugere-se que sejam efetuados estudos sobre o aproveitamento dos materiais mais grosseiros para uso geotectônico ou cerâmico. Encontrar formas de uso da parte mais grosseira dos sedimentos transportados pelo Rio poderá trazer benefícios ambientais e econômicos, uma vez que pequenas olarias ou empresas podem ser instaladas nas proximidades. Paralelamente, o uso de bosques energéticos e viveiros poderá fomentar o reflorestamento da área.

Área 5 (185,4 km²): O alto grau de antropização, caracterizado principalmente por atividades pecuárias numa área que possui uma alta densidade de drenagem, com os cursos d'água confluindo para o rio Tocantins, foi o principal motivo para a seleção dessa área. Os solos predominantes na área são podzólicos vermelho-amarelo, de

textura arenosa e média. As declividades variam entre 0 e 30%. As recomendações para esta área, necessariamente devem levar em conta o perfil econômico instalado naquela região. Vale dizer que qualquer proposta precisa considerar o envolvimento da atividade de pecuária. Neste sentido, seria interessante capacitar os produtores em práticas de manejo mais adequadas, que levassem em conta a rotação dos pastos e o confinamento de parte dos rebanhos.

A solução dos problemas decorrentes da erosão não depende da ação isolada de um produtor. A erosão produz efeitos negativos para o conjunto dos produtores rurais e para as comunidades urbanas. Um plano de uso, manejo e conservação do solo e da água deve contar com o envolvimento efetivo do produtor, do técnico, dos dirigentes e da comunidade [19]. Além disto, o oferecimento de tecnologias de baixo impacto, como é o caso da proposta deste Projeto, associados a Programas de educação ambiental, de geração de renda e de agroextrativismo, poderão tornar a região menos propensa a eventos erosivos.

Para que estas medidas sejam, de fato, efetivas é necessário que o planejamento de uso das terras seja estratégico para a região, bem como para a geração de energia da UHE de Tucuruí. Neste caso, e considerando o alto índice pluviométrico, seria interessante encontrar e difundir um melhor aproveitamento das águas das chuvas. Esta medida, além de evitar perdas excessivas por escoamento superficial, pode criar condições para que a água pluvial se infiltre no solo. A construção de reservatórios subterrâneos ou mini barramentos tem a função de aumentar as áreas de maior fertilidade e de garantir o suprimento de água para as culturas, animais e usos domésticos. Esta medida tem ainda um caráter de melhoramento dos índices de saúde da população que passaria a ter água de melhor qualidade.

Para tanto, uma cobertura vegetal adequada assume importância fundamental para a diminuição do impacto das gotas de chuva e a redução da velocidade das águas que escorrem sobre o terreno, possibilitando maior infiltração de água no solo e diminuição do carreamento das suas partículas.

VI. Agroflorestas Sucessionais

A partir dos dados levantados e apresentados nos itens anteriores é possível afirmar que a região localizada no entorno do reservatório de Tucuruí tem um grande potencial para se converter em um centro de tecnologias voltadas para a recuperação ambiental em função de diversos fatores, entre os quais se destacam:

- Localização em uma zona de fragilidade ambiental (arco do desmatamento);
- Apresenta elevado grau de disputas pelos recursos naturais (geração de energia, madeira, terras baratas e minérios);
- Apresenta uma alta diversidade social e econômica (índios, madeireiros, pecuaristas, agricultores familiares e pescadores);
- É uma região estratégica do ponto de vista da geração de energia elétrica (abastece sozinha cerca de 10% do que é consumido no Brasil);
- Possui pontos críticos no que se refere à erosão, devido ao uso inadequado do solo;
- Apresenta solos de baixa fertilidade natural, o que é agravado pela retirada da cobertura vegetal;
- Possui acúmulo de sedimentos com boas características geoquímicas, o que lhes confere um caráter de remineralizador de solos; e
- Apresenta forte depressionamento no período de seca, o que viabiliza a retirada de sedimentos das margens.

Encontrar alternativas ecológicas e socioeconômicas que amenize as disputas na região pode facilitar o desenvolvimento de uma nova forma de uso e ocupação da região, dentro de princípios mais harmônicos, com desenvolvimento
mais justo e voltado para as aptidões regionais.

A pesquisa mostrou que do ponto de vista geoquímico os sedimentos acumulados no Reservatório mostram-se como potenciais remineralizadores dos solos. A recuperação das áreas que apresentam fragilidades em função do uso inadequado no entorno do Reservatório pode ser estratégica para a atividade de geração de energia na UHE de Tucuruí. Em nível local (entorno do reservatório), esta pesquisa recomenda o uso de Sistemas Agroflorestais sucessionais e biodiversos. Para atender este pressuposto o cultivo de sistemas complexos e diversificados mostra-se como uma excelente forma de recuperação de áreas degradadas por atividades produtivas, ou mesmo pela implantação do Reservatório, pois tais sistemas prevêem que a fertilidade dos solos, o controle fitosanitário e a produtividade dos agroecossistemas poderão ser garantidos por interações benéficas entre os solos e as plantas cultivadas e as árvores.

Os Sistemas Agroflorestais (SAFs) ou Agroflorestas são uma forma de praticar um dos princípios elementares da Agroecologia: o uso de policultivos complexos e biodiversos que intercalam diferentes espécies e são capazes de promover seus próprios estoques de nutrientes, diminuir suas perdas pela ação de fitopatógenos por meio de mecanismos biológicos e obter rendimentos totais por hectare mais altos quando comparados com os sistemas considerados modernos (monocultivos) [20]. O desafio consiste em "*desenhar agroecossistemas que explorem as vantagens de alguns dos atributos benéficos dos estágios iniciais da sucessão e que, também, incorporem algumas das vantagens ganhas ao permitir que o sistema alcance os estágios mais avançados*" [21].

O conceito de sucessão aplicado ao desenvolvimento de agroflorestas permite que sejam elaborados diversos sistemas de produção adaptados a distintas realidades, uma vez que os modelos sucessionais de referência são os ecossistemas originais de cada local. O que se propõe quando se trabalha com as Agroflorestas Sucessionais é que seja observado com atenção à alta diversidade de uma floresta natural, onde inúmeras espécies se desenvolvem muito próximas umas das outras, ocupando, no entanto, diferentes estratos, atuando em diferentes estágios da sucessão e com necessidades luminosas e nutricionais distintas [22]. Tais princípios vêm ao encontro dos objetivos desta pesquisa, uma vez que conhecendo as potencialidades geoquímicas dos sedimentos e de algumas rochas que afloram na região, e a restrição nutricional dos solos, pode-se supor que a regeneração do sistema de floresta poderá ocorrer sem grandes dispêndios econômicos. Além disto, e mais importante, a tecnologia proposta desta pesquisa é de fácil assimilação, com custos reduzidos e resultados relativamente rápidos.

A. Unidade experimental

Para testar esta hipótese, foi implantada uma Unidade Experimental, utilizando-se os princípios do sistema agroflorestal (SAF) na área da Usina da ELN, em Tucuruí. Para a implantação do SAF consideraram-se as características de fertilidade dos solos onde o mesmo foi implantado, e que representa uma média da região, conforme se pôde comparar a partir dos dados obtidos nas etapas anteriores. Tais dados mostraram que os solos da região são extremamente ácidos e com porcentagens mínimas de macro e micronutrientes disponíveis. Levou-se em conta, também, a disponibilidade e a presença nos principais macronutrientes dos sedimentos e das rochas que foram selecionadas para compor e melhorar a mistura (filitos e margas carbonáticas moídas).

Este procedimento facilita a comparação dos resultados obtidos nas diferentes parcelas. Os principais aspectos de fertilidade avaliados foram o pH e os teores de fósforo (P), potássio (K), que são dados em ppm, de cálcio (Ca), de magnésio (Mg) e de alumínio (Al) em meq/100 cc disponíveis.

Na elaboração do *design* do SAF, consideraram-se, ainda, resultados dos testes efetuados em experimento em vaso, conduzido também nesta pesquisa. Para a implantação da Unidade Experimental efetuou-se uma nova coleta de solos, dos sedimentos retirados nas proximidades do ponto TUC 04 e das rochas moídas.

A área total do SAF é de 900 m^2. Esta área foi dividida em 12 parcelas que receberam quatro tipos de tratamento (com base nos dados obtidos no experimento em vaso) e três diferentes adensamentos de espécies arbóreas nativas. Cada parcela foi dividida por valas com 10 cm de largura e 20 cm de profundidade. O objetivo desta medida foi o de evitar possíveis interferências entre os distintos tratamentos. A Figura 10 mostra a distribuição das misturas (sedimentos, rochas, NPK e composto orgânico).

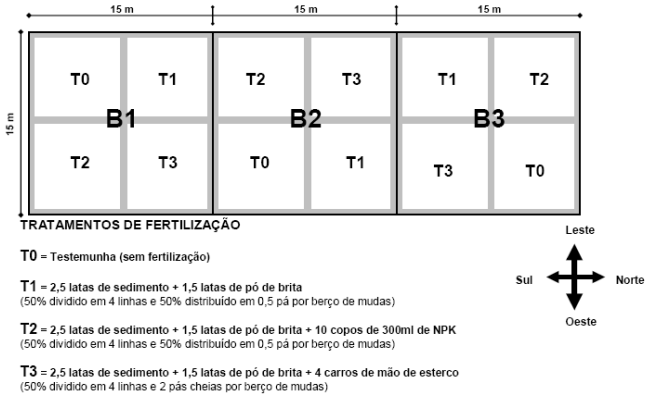


Figura 10 – *Design* do SAF – distribuição das misturas de fertilizantes e adensamento de espécies.

Durante a atividade de implantação do SAF foram efetuadas as seguintes ações: (i) Piqueteamento dos blocos de SAFs e escavação das valas de tratamento; (ii) Preparo das três misturas e coleta de amostras das mesmas; (iii) Incorporação manual dos fertilizantes nos berços de mudas e nos sulcos para plantio de sementes; (iv) Plantio das espécies florestais; (v) Plantio das espécies agrícolas e leguminosas; (vi) Cobertura do solo com matéria orgânica e; (vii) Instalação do sistema de irrigação.

Na parcela testemunha (**T0**) não foi aplicado nem um tipo de insumo e, portanto, a mesma representa as características naturais do solo da região. Nas parcelas de tratamento **T1** foram aplicadas 30 kg de sedimento e 30 kg de pó de rocha (50% dividido em 4 linhas e 50% distribuído em 0,5 pá por berço de mudas). Nas parcelas de tratamento **T2** foram aplicadas 30Kg de sedimento + 30kg pó de rocha + 3kg de NPK – dosagem 10:10:10 (50% dividido em 4 linhas e 50% distribuído em 0,5 pá por berço de mudas). Nas parcelas **T3** utilizou-se 30kg de sedimento + 30kg de pó de rocha + 120 kg de esterco (50% dividido em 4 linhas e 2 pás cheias por berço de mudas). As espécies foram plantadas em linha.

Considerando estes procedimentos, a Figura 11 apresenta a lista de espécies florestais nativas incorporadas no SAF, bem como sua distribuição nas diferentes parcelas. Além das plantas nativas, foram distribuídas sementes de espécies agrícolas de ciclo curto (Milho, Feijão de Porco, Feijão Guandu, Quiabo e Abóbora) e de leguminosas (Crotolária, Leucena, Coquetel de sementes e bananeiras). As bananeiras foram plantadas no mesmo berço das mudas de espécies florestais.

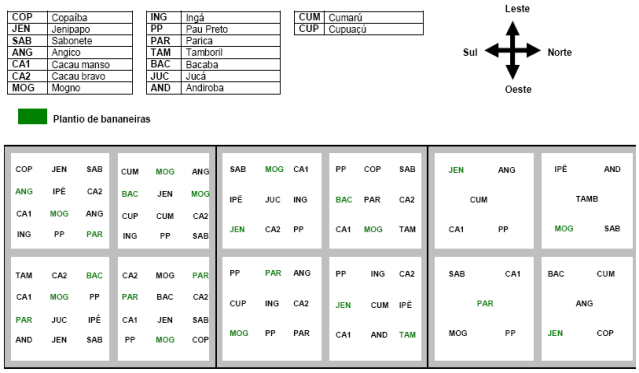


Figura 11 – Distribuição das espécies florestais nas diferentes parcelas segundo o adensamento.

A distribuição das espécies florestais nativas da região foi feita segundo os diferentes tratamentos e adensamentos. A distribuição das espécies agrícolas e leguminosas obedeceu ao esquema mostrado na Figura 12.

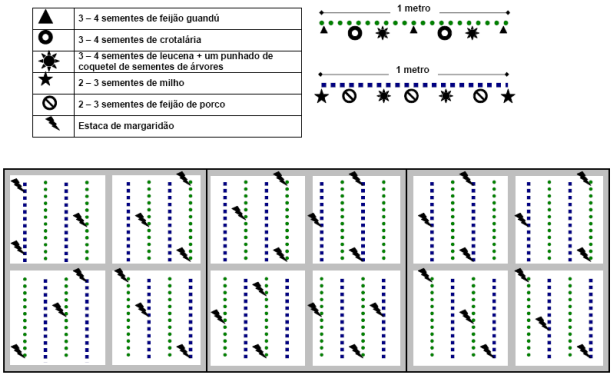


Figura 12 – Distribuição das espécies agrícolas e das leguminosas

B. Resultados preliminares da unidade experimental

Após sete meses de acompanhamento foi possível avaliar alguns resultados com relação ao crescimento inicial da agrofloresta implantada como Unidade Experimental, mostrando o potencial uso do sedimento e do pó de rocha como fertilizantes para esse modelo. Foi realizada uma série

de atividades para avaliar quantitativa e qualitativamente o desempenho do sistema, tais como:

- ✓ medição da altura das mudas de árvores para determinar o crescimento inicial das espécies perenes;
- ✓ contagem de árvores que germinaram a partir do coquetel de sementes para avaliação de germinação nos diferentes tratamentos;
- ✓ medição das espécies de ciclo médio para avaliar o estabelecimento inicial das mesmas nos diferentes tratamentos;
- ✓ colheita de variedades de ciclo curto e medições em laboratório para estabelecer critérios comparativos das produções relativas aos diferentes tratamentos. Os resultados foram tabulados e analisados por gráficos comparativos entre os diferentes tratamentos de fertilização e blocos de adensamento.

Paralelamente, foi feito o registro fotográfico do desempenho do sistema, o que também oferece a oportunidade de uma avaliação mais rápida e simples, especialmente para agricultores familiares que eventualmente venham a incorporar tais práticas em seus sistemas de cultivo e produção florestal. A Figura 13 mostra o desenvolvimento de uma cultura de ciclo curto, o milho (*Zea mays*), e outra de ciclo longo, o cacau (*Theobroma sp.*).

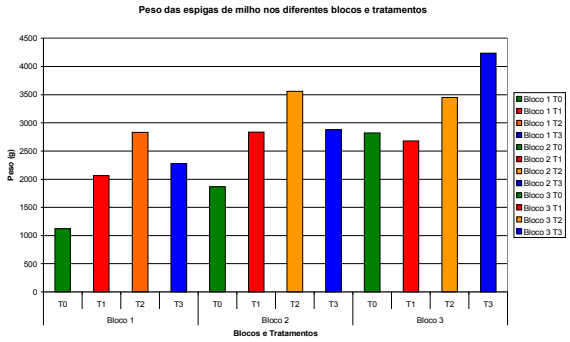


Figura 13 – Peso das espigas de milho nos diferentes blocos e tratamentos

Os resultados demonstram que houve uma maior produção do milho nas parcelas que receberam os tratamentos com NPK e esterco compostado (**T2** e **T3**), uma vez que são culturas com alta exigência de Nitrogênio para o seu desenvolvimento e para uma boa produção de grãos. Com relação aos diferentes blocos, os melhores resultados foram observados nos blocos com menor adensamento, uma vez que as espécies de crescimento rápido exigem alta luminosidade para seu desenvolvimento e produção.

Com relação ao crescimento do Cacau (Theobroma sp.), pode-se dizer que esse apresentou um melhor padrão de crescimento e um maior incremento em altura nas parcelas que receberam a adubação de sedimento + pó de rocha + composto orgânico (**T3**). A comparação entre blocos de adensamentos distintos mostrou que o Bloco 01, com maior adensamento, apresenta claras vantagens para o desenvolvimento inicial da espécie, tanto com relação ao seu padrão de crescimento quanto ao seu incremento total em altura. Tal fato comprova uma das características desta espécie, qual seja, a necessidade de sombreamento. Uma cultura de ciclo médio que tem apresentado excelente desenvolvimento é a bananeira. Conforme mencionado anteriormente, as bananeiras foram plantadas no berço das mudas florestais, com a função de proteger a fazer sombra, especialmente para aquelas espécies, como o cacau, que precisam de proteção de luminosidade.

As espécies, Pau Preto e Mogno, também têm apresentado um crescimento bastante significativo, especialmente nas parcelas **T3,** que receberam matéria orgânica (esterco compostado) na mistura com os sedimentos e pó de rocha. Já o Paricá vem apresentando melhor desempenho nas parcelas onde houve a mistura com NPK, mostrando com isto que esta espécie precisa de uma fonte de macronutrientes prontamente disponível para o seu desenvolvimento inicial.

Além dos resultados de crescimento apresentados, outros fatores importantes merecem serem mencionados: (i) ocorreu uma alta taxa de germinação do coquetel de sementes que foi distribuído nas linhas das plantas leguminosas. Várias espécies, tais como Paricá, angico, mogno e ipê já apresentam tamanhos de até 15 cm, demonstrando que o adensamento futuro da Unidade Experimental estará garantido e (ii) ocorreu, também, a germinação de uma grande quantidade de espécies (manga, castanhola, andiroba, sabonete etc) que germinaram a partir de sementes que chegaram ao SAF por meio da cobertura de matéria orgânica, introduzida para proteger o solo até que as espécies de ciclo curto alcançassem porte suficiente para proteger o solo e produzir sombra para as espécies florestais. Outra característica observada nestes primeiros meses do SAF foi a diversidade de insetos e pássaros que ocorre ou passou a utilizar a Unidade Experimental. Muito provavelmente este fato está relacionado à floração das espécies leguminosas e da presença da flor do mel (*Thitonia* diversifolia) acrescentada ao SAF como fonte potencial de nitrogênio e fósforo orgânico, bem como formar uma barreira de proteção em alguns pontos laterais do SAF. É importante destacar que a *Thithonia* vem sendo utilizada em vários países tropicais como fonte alternativa para melhorar a disponibilidade de fósforo em solos ácidos e lixiviados, como é o caso dos solos da região do entorno.

A partir destes resultados preliminares é possível afirmar que a alta diversidade e a reprodução do ambiente de floresta nativa são a chave para o sucesso das agroflorestas. O desafio consiste em reproduzir ao máximo o ambiente natural encontrado pelas plantas em seu crescimento, especialmente quando se trata de culturas perenes. A menor produção de espécies de ciclo curto conferida pelo alto adensamento de plantas será compensada em algum tempo pelos altos rendimentos obtidos com a produção de espécies de ciclo longo que possuem um valor agregado muito maior, mostrando, assim, as vantagens de produção dentro desse modelo.

VI. Conclusões e Recomendações

Os resultados obtidos nesta pesquisa confirmaram a vulnerabilidade da área de influência do entorno do reservatório de Tucuruí, uma vez que a mesma apresenta-se como uma região de contrastes, tanto do ponto de vista econômico, quanto social e ambiental. Até o momento as estratégias para minimizar os conflitos e contrastes existentes na região não têm surtido os efeitos desejados, porque em muitos casos, uma parte dos atores mais importantes nas disputas não é claramente percebida pelos demais envolvidos.

Tal fato ocorre porque o dinamismo econômico-produtivo da região está diretamente vinculado a uma demanda difusa,

em nível nacional e até internacional, dos produtos e recursos que ocorrem naquela região. As atividades antrópicas aliadas às elevadas taxas de intemperismo que conduzem a um empobrecimento natural do solo, devido à forte lixiviação das partículas mais finas onde se concentram os materiais orgânicos e os macro e micro nutrientes, poderão ser dramaticamente acentuadas em função do uso inadequado dos solos.

Neste sentido, os estudos desenvolvidos no âmbito desta pesquisa mostraram que é possível encontrar mecanismos e alternativas locais para minorar parte destes problemas, especialmente aqueles relacionados à geração de energia elétrica e à recuperação de áreas desflorestadas, com geração de renda para os agricultores/pescadores que utilizam as margens do reservatório ou suas ilhas. A pesquisa comprovou a hipótese inicial de que os sedimentos acumulados no Reservatório, juntamente com rochas que ocorrem na região podem ser utilizados para incrementar a fertilidade dos solos das áreas do entorno do Lago, trazendo grandes benefícios à população, bem como para a recuperação de áreas degradadas. Após uma série de análises e experimentos, tais materiais configuram-se como ótimos remineralizadores/rejuvenescedores dos solos, uma vez que quimicamente são compostos por macro e micronutrientes importantes para o desenvolvimento vegetal, facilitando, assim, o desenvolvimento de espécies florestais, em projetos de revegetação.

Verificou-se que, de modo geral, os valores encontrados para os principais macronutrientes são maiores nas amostras dos sedimentos coletados no Reservatório do que nos solos das áreas comparadas (entorno e solos da Amazônia, em geral). Além disso, as quantidades de micronutrientes são bem maiores nas amostras de sedimentos. Foi observado que o grupo dos óxidos mais insolúveis (SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3) mostra valores de concentrações similares ou levemente superiores aos encontrados nos solos da Amazônia ou do entorno do reservatório. Este fato pode estar indicando que o barramento favorece a reconcentração destes elementos no fundo do lago. No entanto, como eles apresentam valores similares à média dos solos comparados, mas com tendência de distribuição diferente, pode-se supor que os óxidos de Alumínio e Ferro são os principais componentes dos sedimentos finos com granulação de argila que são depositadas mais à jusante. Considerando que a distribuição do Fósforo guarda semelhanças com a distribuição do Ferro e Alumínio, sugere-se que o mesmo, por afinidade geoquímica, esteja fazendo parte do material argiloso rico nestes nutrientes.

O estudo das argilas revelou que grande parte dos sedimentos é composta por caolinita, mas que é possível encontrar inter-estratificados de ilita. A presença de esmectitas foi verificada na parte sul do reservatório, provavelmente por influência das rochas mais alcalinas, da Formação Tucuruí, que ocorrem nas proximidades daquela área, ou ainda das rochas kamafurgiticas que ocorrem ao sul da cidade de Marabá. A liberação mais rápida dos macro e micronutrientes presentes nas argilas poderá ocorrer por meio de dissolução com ácidos orgânicos, ou mesmo pela mistura com rochas moídas mais alcalinas. O grupo de elementos mais solúveis (K, Ca e Mg) mostra concentrações baixas nos sedimentos acumulados, quando comparada a solos considerados férteis. As baixas concentrações destes elementos indicam que os mesmos são bastante solúveis. É provável que parte destes nutrientes tenha sido rapidamente lixiviada para a coluna de água. No entanto, as concentrações destes elementos, juntamente com o fósforo, são superiores àquelas encontradas nos solos do entorno.

De toda forma, as quantidades encontradas destes nutrientes nos sedimentos favorecem o seu uso como remineralizadores dos solos da área de entorno. Adicionalmente, a quantidade de matéria orgânica que constitui a grande parte dos sedimentos depositados no reservatório favorece o desempenho dos sedimentos como insumo agrícola. Além dessas características positivas, o acréscimo de pó de rocha (filitos carbonáticos) atua como uma fonte suplementar dos principais nutrientes, (Ca e Mg), que ocorrem nos carbonatos presentes nas rochas.

A retirada do sedimento poderá se dar, em um primeiro momento, nos períodos de depressionamento do reservatório, nas margens, especialmente quando a cota mínima chega a alcançar cerca de 60 m. Considerando que a área total da APA encontra-se em avançado estágio de alteração antrópica, o uso dos sedimentos para auxiliar na recuperação das áreas degradadas pode se configurar como uma grande possibilidade para reverter os problemas ambientais e de produção da região.

No que se refere à qualidade da água, o estudo identificou que as concentrações de nutrientes (Nitrogênio e Fósforo) são baixas, e encontram-se inferiores ao limite que define os sistemas como eutrófico (35 mg/L para o fósforo Total). Os primeiros são tendencialmente mais elevados no período úmido. Contrariamente, as concentrações de Fósforo Total e de Fósforo reativo dissolvido apresentam-se inferiores no período úmido, o que poderá estar relacionado com o seu elevado consumo por parte dos produtores primários à superfície e à ausência de libertação do substrato. Além disto, pode estar relacionado à diminuição da biomassa algal e, conseqüentemente, menor consumo de fósforo com maior disponibilidade deste elemento para a água.

Os parâmetros de mineralização analisados (cloretos, cálcio e alcalinidade) são baixos sem apresentarem um padrão específico de variação quer espacial quer temporal. Por último, relativamente às concentrações de clorofila *a* (indicador de biomassa algal), os pontos amostrados, de um modo geral, evidenciam uma concentração inferior ao limite mínimo a partir do qual um sistema é classificado como eutrófico (8 μg/L). De modo geral, pode-se dizer que a água apresenta qualidade adequada em termos de sustentabilidade do sistema. Os estudos relativos à erosão laminar e linear forneceram indicadores importantes para a delimitação das áreas mais frágeis e que, portanto, necessitarão de medidas mais urgentes e acompanhamento mais sistemático. Por meio deste estudo pode-se concluir que a região de influência do reservatório de Tucuruí apresenta baixo potencial atual à erosão laminar em 74,8% da área, devido em grande parte a conformação geopedológica e, também, a existência de áreas ainda preservadas. Apesar das áreas de médio e alto potencial ocorrerem em apenas 25,2% da área estudada, a sua localização e preservação são fundamentais, uma vez que as mesmas estão localizadas muito próximas do reservatório, podendo contribuir para o seu assoreamento.

O estudo de erosão desta pesquisa indicou algumas áreas de maior fragilidade e que são prioritárias para a recuperação, vez que as mesmas representam os maiores

riscos de assoreamento para o reservatório. Os indicadores de fragilidade estão relacionados a feições erosivas, a proximidade das cabeceiras das drenagens que abastecem o reservatório e a obras de infra-estrutura. Obviamente que as medidas para um uso mais sustentável, recomendadas nesta pesquisa, não esgotam as possibilidades, mas caso sejam efetivadas podem reduzir parte dos problemas de conflito e de assoreamento do reservatório.

Os resultados obtidos na Unidade Demonstrativa, em suas diferentes parcelas e blocos, indicam que o uso de sedimentos e pós de rochas para recuperar ou melhorar as características de fertilidade dos solos da região são muito positivos, uma vez que grande parte das espécies agrícolas, leguminosas ou florestais apresentou um desenvolvimento bastante acelerado, quando comparados às testemunhas onde não ocorreu nem um tipo de fertilização.

A partir dos resultados é possível afirmar que a reprodução do ambiente de floresta nativa configura-se como chave para o sucesso das medidas de recuperação das áreas degradadas, bem como demonstra que a produção de alimentos poderá ser obtida de modo mais adequado e eficaz, tanto do ponto de vista produtivo quanto ambiental. O desafio consiste em reproduzir ao máximo o ambiente natural encontrado pelas plantas em seu crescimento, especialmente quando se trata de culturas perenes. A menor produção de espécies de ciclo curto conferida pelo alto adensamento de plantas será compensada em algum tempo pelos altos rendimentos obtidos com a produção de espécies de ciclo longo que possuem um valor agregado muito maior, mostrando as vantagens de produção dento desse modelo.

Ainda relativamente à preservação da vida útil do reservatório, recomenda-se que as medidas para minorar os problemas de erosão considerem os parâmetros apresentados e utilizem as proposições de uso mais sustentável da região. As medidas e alternativas, apesar de serem simples e já bastante difundidas, trarão benefícios para o sistema como um todo, bem como assegurarão um uso mais adequado daquele ecossistema, garantindo que as áreas próximas ao Reservatório estarão recuperadas e com usos diversos.

Por fim, mas não menos importante, a divulgação dos resultados e benefícios obtidos a partir desta pesquisa podem se converter em mecanismos eficientes para a redução ou minimização de parte dos conflitos socioambientais da região, que tenham como maior objeto a disputa pelo uso das áreas do entorno do reservatório. A natureza de tais embates tem um viés econômico muito forte e, portanto, pode ser trabalhado na perspectiva ou no âmbito da compensação ambiental, que é uma forma não assistencialista de resolver as constantes demandas dos atingidos pelo barramento.

VII. Agradecimentos

Os autores agradecem aos empregados da ELN, em especial o Geólogo Bruno Payola, pelas contribuições e ajuda em todas as fases deste projeto. Gostaríamos de agradecer a atenção dos funcionários da FINATEC, que sempre mostraram boa vontade para atender as solicitações feitas pela coordenação do Projeto.

VIII. Referências Bibliográficas

[1] MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – SRH. (2005). Plano Nacional de Recursos Hídricos. Programa de Estruturação Institucional para a Consolidação da Política Nacional de Recursos.

[2] ALVES, D.S., MOREIRA, J.C., MELLO, E.M.K., SOARES, J.V., SILVA, O.F., ALMEIDA, S.A.S., ORTIZ, J.O. & AMARAL, S. (1996). Mapeamento do uso da terra em Rondônia utilizando técnicas de segmentação e classificação de imagens TM. (CD ROM). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador. Anais. 392 -400pp.

[3] TASSINARI C. G. & MACAMBIRA M. J. B. (1999) Geochronological Provinces of the Amazoniam Craton. Episodes 22, 174-182.

[4] IANNIRUBERTO, M, NASCIMENTO C.T., NASCIMENTO B. M.,THEODORO, S.H O (2008) Uso do sonar de varredura lateral para caracterizar a morfologia do fundo do reservatório de Tucuruí. Ver. Brasileira de Geofisica (no Prelo)

[5] LEONARDOS, O.H., FYFE, W.S. & KRONBERG, B.I. Rochagem: O método de aumento da fertilidade em solos lixiviados e arenosos. Anais 29 Congr. Brasil. Geol., Belo Horizonte, pp.: 137 - 145, 1976.

[6] LEONARDOS O. H., THEODORO S. H. & ASSAD M. L. (2000) Remineralization for sustainable agriculture: A tropical perspective from a Brasilian viewpoint. Nutrient Cycling in Agroecosystems - Formerly Fertilizer Research 56, 3 - 9.

[7] THEODORO S. C. H. (2000) A fertilização da Terra pela Terra: Uma alternativa de sustentabilidade para o pequeno produtor rural. Tese de Doutorado. CDS/UnB, Brasília.

[8] THEODORO S. M. S. H & LEONARDOS O. H. (2006) The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. Annals of Acad. Braz of Cienc. Rio de Janeiro/RJ. No 78, Vol. 4, 715-720.

[9] THEODORO, S. H; FONSECA, R. M; BARRIGA, F.J.A.S; MACEDO, I. L. & MORAIS, M. M (2007) The use of accumulated sediments in the Tucuruí and Três Marias dams to recover degraded soils In: GUNKEL, G & SOBRAL, M. C Reservoirs and River Basins Management: Exchange of Experience from Brazil, Portugal and Germany.Verlag Technische Universität Berlin.ISBN. p 211-225.

[10] FONSECA, R. (2002) As albufeiras como estações de trânsito na sedimentação. Estudo geológico sobre a re-utilização de sedimentos de sistemas portugueses e brasileiros. Unpublished. Tese de doutoramento, Universidade de Évora, 649 p.

[11] FONSECA, R. & THEODORO, S. (2005) - Novos desafios na agroecologia luso-brasileira: reabilitação química de solos empobrecidos através do uso de recursos geológicos renováveis. Actas da XVI Semana de Geoquímica e VIII Cong. de Geoq. dos Países de Língua Portuguesa, Depart. de Geociências, Universidade de Aveiro, Portugal, 11 a 16 de Julho de 2005, Volume 2, pp. 647-651

[12] FONSECA R, BARRIGA FJAS, TAZAKI K (2007a) Land erosion and associated evolution of clay minerals assemblages from soils to artificial lakes in two distinct climate regimes in Portugal and Brazil. Clay Minerals", Journal of the European Clay Groups, Mineralogical Society, 42(2): 153-171.

[13] KRONBERG, B.I; LEONARDOS, O.H. & FYFE, W.S. (1987). The chemistry of some brazilian soils element mobility during intense weathering. Chemical Geology, 60, pp.: 361-370.

[14] CARVALHO, N.O. (2008). Hidrossedimentologia Prática. 2ª Edição Revisada e Ampliada. Ed. Interciência. Rio de Janeiro, RJ. 599p.

[15] MERTEN, G.H.; CAVIGLIONE, J.H.; CIACOMINI, D.C.; RUFINO, R.L.; MEDEIROS, G.; SAINTRAINT, D.; RIBAS, G.C.; DEDECEK, R.; KESSLER, C.A. (1995). El uso del SIG del modelo USLE para determinar mapas de erosion potencial y actual en las microcuencas pilotos de Água Grande y Córrego do Pensamento, Mamborê, Paraná, Brasil. Santiago, Chile: Proyeto Regional GCP/RLA/107/JPN, 43p.

[16] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. (1990). Orientações para o Combate à Erosão no Estado de São Paulo, Bacia do Pardo Grande. São Paulo, 3v. (IPT. Relatório, 28:184).

[17] MAYER, L.D. & WISCHMEIER, W.H. (1969). Mathematical simulation of the process of soil erosion by water: Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 12: 754-758, 762.

[18] CAMPANGNOLI, F (2002). A Aplicação do Assoreamento na Definição de Geoindicadores Ambientais em Áreas Urbanas: Exemplo na Bacia do Alto Tietê, SP. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, SP. 192p.

[19]. ARAÚJO, Q.R., MARROCOS, P.C.L. & SERÔDIO, M.H.C.F. Conservação do Solo e da Água. [online] Disponível na Internet via WWW. URL: http://www.ceplac.gov.br/radar/conservacaosolo.htm. Arquivo capturado em 17 de março de 2008.

[20] ROCHA, E. L & THEODORO, S.H (2006) Fertilização organomineral para acelerar o desenvolvimento de agroflorestas sucessionais In: Botelho Fo., F.B - Complexo Agroindustrial e outros estudos. Universidade de Brasília. Centro de Estudos Avançados Multidisciplinares/Núcleo de Estudos Rurais V. 6 n. 26: 231-245.

[21] GLIESSMAN, S. Agroecologia: processo ecológicos em agricultura sustentável. Porto Alegre: UFRGS, 2000.

[22] PENEREIRO, F. M. Sistemas agroflorestais dirigidos pela sucessão

natural: um estudo de caso. 138p. Dissertação (Mestrado) – Programa de PósGraduação em Ciências Florestais. Escola Superior de Agricultura Luíz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1999.