

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Departamento de Física

Campus de Rio Claro

LEANDRO XAVIER MORENO

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA ANÁLISE DE FLUXO DE CO₂ DO SOLO PELO MÉTODO DE ABSORÇÃO DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre na Área de Concentração em Física Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Dante Luis Chinaglia

Rio Claro – SP

2012

631.43 Moreno, Leandro Xavier
M843d Desenvolvimento de sistema para análise de fluxo de
CO₂ do solo pelo método de absorção de radiação
infravermelha / Leandro Xavier Moreno. - Rio Claro : [s.n.],
2012
82 f. : il., figs., gráfs., tabs., fots.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Dante Luis Chinaglia
1. Física do solo. 2. Respiração do solo. 3.
Instrumentação. 4. IRGA. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

LEANDRO XAVIER MORENO

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA ANÁLISE DE FLUXO DE CO₂ DO SOLO PELO MÉTODO DE ABSORÇÃO DE RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre na Área de Concentração em Física Aplicada.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Dante Luis Chinaglia _____

Prof. Dr. Roberto Domingos Naves _____

Prof. Dr. Giovanni Gozzi _____

Rio Claro, 27 de fevereiro de 2012

Resultado: Aprovado

Dedico

Ao meu Deus que me dirigiu e me sustentou até aqui, aos meus pais pelo apoio e confiança em todos os momentos, e a todos que direta ou indiretamente colaboraram para que este trabalho fosse possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sua direção e amparo durante todos os momentos de minha vida, por me dar forças frente às dificuldades, coragem ante os novos desafios e por poder desfrutar da alegria das vitórias que Ele me concedeu.

Aos meus pais Oswaldo Moreno Rúbio e Cacilda Xavier Moreno, pela sua confiança e apoio durante toda minha trajetória, pelo incentivo ao estudo e a conquista de novos horizontes, pelo sustento e companhia em todos os momentos, a eles a minha eterna gratidão.

A Ester Macarenco, por sua presença em minha vida e por tudo o que pude aprender ao seu lado. Agradeço a Deus por todos os momentos em que estivemos juntos, por sua paciência, carinho e atenção.

Ao Prof. Dante Luis Chinaglia, meu orientador, pelo seu total apoio e direção, sem os quais esse trabalho não poderia ter sido concluído. Pelos bons momentos de conversa e sua orientação e conselhos, que fizeram total diferença não apenas ao projeto, mas para a vida acadêmica de um modo geral.

Ao Prof. Roberto Naves Domingos, meu primeiro orientador, por me aceitar como aluno e me apresentar o projeto, que hoje resulta neste trabalho. Agradeço por seu apoio e atenção dispensada durante todo esse trabalho, sem o qual esse trabalho não seria possível.

Agradeço a Profa. Deisy Piedade Munhoz, por todo seu apoio desde o período de graduação e durante todo o curso de mestrado, pelo seu incansável incentivo, pela sua constante direção e conselhos, pela sua participação fundamental para a decisão e ingresso neste programa de mestrado, a minha eterna gratidão.

Ao Dr. Alex Vladimir Krusche e a Alexandra Ayres Montebelo, do Laboratório de Análise Ambiental e Geoprocessamento do CENA – USP de Piracicaba, pelas orientações sugeridas e pelas calibrações do LI-COR LI-840, fundamentais para o andamento deste trabalho.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de mestrado.

Meus agradecimentos ao Prof. Timoni e a Rodrigo Magalhães do Horto Florestal de Rio Claro, pelas sugestões e esclarecimentos.

A Cláudio Luiz Silva Bocaiúva, responsável pela oficina mecânica do departamento de Física do IGCE, pelo seu apoio e ajuda necessária a realização deste projeto.

Aos técnicos Geraldo Aparecido de Lima Sobrinho e Saulo Ricardo Canola do departamento de Física, pela ajuda e apoio nas mais diversas situações.

As secretárias Rosana Angélica Gonçalves Pesce e Maristela Carlos Rebutini do Departamento de Física, pela sua atenção e ajuda em todos os momentos.

A todos os docentes e funcionário do Departamento de Física, pela atenção e apoio.

Ao meu amigo de curso, William Chiappim Junior, agradeço sua amizade, por todo apoio e ajuda, pelas boas conversas e reflexões, durante a longa trajetória da graduação ao mestrado.

A Renato Sturion Martins e Gessica Rinaldi, por sua amizade e presença durante a graduação e todo o período deste mestrado.

A Tiago Botari, pela sua amizade, paciência e pronta disposição para ajudar, cuja contribuição foi de grande relevância para a conclusão deste trabalho.

O meu agradecimento aos meus amigos de república Bruno Moser, Luís Felipe, Carlos e Amanda Sponton, Vinicius Tadeu, Murilo Sierro, Júlio e Cintia dos Santos, Tiago Provenzano, Renato Cagnin e Rafael Vichiatti, e aos meus amigos de ABU, Silas Melo, Kleber, Willy Bohn, Juliana Coutinho, Carol e Pedro Ivo. E a todos os meus amigos e colegas de curso, pela ajuda e presença durante toda esta caminhada, o meu muito obrigado.

A Escola Nazarena de Ensino Fundamental, a todos os professores e funcionários, em especial a Virginia Borges, Claudia Biazon, Pr Luis Henrique e Pr. Geraldo, dona Roseli e ao professor Demétrio Tadeu Ceccatto.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para o andamento e conclusão deste trabalho.

“Feliz a pessoa que acha sabedoria e que consegue compreender as coisas, pois isso é melhor do que a prata e tem mais valor do que o ouro. Ser sábio é melhor do que ser forte; o conhecimento é mais importante do que a força.”

Provérbios 3.13 e 14, 24.5

RESUMO

Em função do chamado aquecimento global, diversos setores da sociedade vêm se mobilizando em busca da compreensão e uma possível solução para este problema. A comunidade científica internacional tem sua atenção voltada para este fato já há algumas décadas e, por meio deste esforço, a sociedade civil tem sido alertada a cerca da importância da adoção de medidas para a contenção dos chamados gases de efeito estufa, em especial o CO₂. Além de medidas para a contenção da emissão, a administração de reservas florestais e a melhoria de técnicas de manejo e uso do solo tem recebido especial atenção, pois estes podem atuar como sumidouros ou vertedouros de CO₂. Dentro deste contexto, a quantificação do CO₂ emitido pelos mais diferentes solos do planeta, é parte fundamental para o entendimento deste processo como um todo. Assim, no presente trabalho buscamos desenvolver um sistema de medidas para a quantificação dos fluxos de CO₂ provenientes da respiração do solo. Este sistema foi desenvolvido a partir de um analisador de gás infravermelho (IRGA), modelo LI-840 produzido pela companhia Li-Cor, acoplado a uma câmara dinâmica por meio de uma bomba de circulação. Este sistema representa com vantagens, uma alternativa aos diversos sistemas comerciais disponíveis para este fim. Dentre estas vantagens podemos destacar; o baixo custo total e de manutenção do sistema, a possibilidade de controle automático ou remoto via internet, a possibilidade de troca do detector para medidas de outros gases e de medida simultânea de outros parâmetros como, por exemplo, umidade, temperatura, pressão e velocidade do ar no local da amostragem. Testes preliminares indicaram que o sistema desenvolvido é muito eficiente para a determinação dos fluxos de CO₂, representando uma alternativa possível e de baixo custo que pode ser aplicada em estudos avançados de respiração de solo.

Palavras-chave: Física do solo, Respiração do Solo, Instrumentação, IRGA.

ABSTRACT

Due to the so-called global warming, various sectors of society have been mobilized to understand and search a possible solution to this problem. The international scientific community has turned its attention to this fact for some decades, and through this effort, the civil society has been advised about the importance of adopting actions to contain the so-called greenhouse gases, especially the CO₂. In addition to procedures to contain the CO₂ emission, the administration of forest and improvement of management techniques of soil has received special attention, because they can act as CO₂ emitters or traps. Inside this context, the quantification of the emitted CO₂ by the different soils of the planet is the key to understand this process as a whole. In the present work we develop a measurement system for the quantification of CO₂ fluxes from the soil. This system was developed from an infrared gas analyzer (IRGA), model LI-840 produced by the company Li-Cor, coupled to one dynamic camera through a circulation pump. This system represents with advantages, an alternative to several commercial systems available for purpose. Among these advantages we can highlight; the low total cost and maintenance, the possibility of automatic or remote control via internet, the possibility of exchanging of the detector for measures of other gases and simultaneously measuring other parameters as, for example, humidity , temperature, pressure and air velocity at the site of sampling. Preliminary tests indicated that the developed system is very efficient for the determination of CO₂ fluxes, representing a possible alternative of low cost that can be applied in advanced studies of soil respiration.

Keywords: Soil physical, soil respiration, Instrumentation, IRGA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo do carbono.	19
Figura 2 - Curva de Keeling.	20
Figura 3 - Localização do primeiro ponto de coleta de dados.	27
Figura 4 - Câmara dinâmica sobre o solo.	28
Figura 5 - Câmara dinâmica em conjunto com um analisador IRGA.	28
Figura 6 - Representação de uma onda eletromagnética.	30
Figura 7 - Espectro eletromagnético e seus comprimentos de onda.	33
Figura 8 - Diagrama esquemático de um sistema de espectroscopia.	34
Figura 9 - Composição básica do IRGA.	36
Figura 10 - LI-840, CO ₂ /H ₂ O Gas Analyser da Li-Cor In.	37
Figura 11 - Caminho óptico do analisador LI-840.	37
Figura 12 - Fonte infravermelha.	38
Figura 13a - Funcionamento do detector duplo.	39
Figura 13b - Aspecto real do detector em funcionamento.	40
Figura 14 - Detector duplo de CO ₂ .	40
Figura 15 - Kit de limpeza que acompanha o analisador Licor LI-840.	42
Figura 16 - Interior do analisador e bancada óptica completa.	42
Figura 17 – Foto do procedimento de limpeza do LI-840.	43
Figura 18 - Tela de calibração do software do LI-840.	45
Figura 19 - Fluxograma geral de funcionamento do sistema.	47
Figura 20 - Fluxograma de funcionamento e operação do sistema.	49
Figura 21 - Montagem do LI-840 na maleta do analisador.	50
Figura 22 - Vista interior da maleta e suas partes constituintes.	51

Figura 23 - Diagrama Pneumático.	51
Figura 24 - Vista do painel superior.	54
Figura 25 - Painel inferior da maleta do analisador.	54
Figura 26 - Vista superior do painel da maleta.	55
Figura 27 - Circuito elétrico da maleta.	56
Figura 28 - Vista traseira da maleta.	57
Figura 29 - Maleta de controle e armazenamento.	60
Figura 30 - Vista interna da maleta de controle e armazenamento.	60
Figura 31 - Circuito elétrico da maleta de controle e armazenamento.	61
Figura 32 - Painel frontal da maleta de controle e armazenamento.	62
Figura 33 - Painel traseiro da maleta de coleta.	63
Figura 34 - Câmara de coleta manual.	64
Figura 35 - Câmara automática em uso.	65
Figura 36 - Fim de curso e caixa de redução.	65
Figura 37 - Montagem completa do sistema.	66
Figura 38 - Concentração de CO ₂ em função do tempo.	67
Figura 39 - Ponto de saturação.	68
Figura 40a - Análise da primeira curva de coleta.	68
Figura 40b - Análise da segunda curva de coleta.	69
Figura 40c - Análise da terceira curva de coleta.	69
Figura 40d - Análise da quarta curva de coleta.	70
Figura 41 - Concentrações de CO ₂ para as 12 primeiras curvas.	71
Figura 42 - Tratamento das quatro primeiras curvas.	71
Figura 43 - Fluxo de CO ₂ em função da temperatura.	74
Figura 44 - Fluxo de CO ₂ em função da pressão do ar.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição média do ar do solo e da atmosfera.	28
Tabela 2 - Fluxos obtidos para as cinco curvas analisadas.	70
Tabela 3 - Dados referentes a todas as 23 curvas e os respectivos fluxos.	73

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	v
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 O ciclo do carbono	17
2.2 O ciclo geológico.....	17
2.3 O ciclo biológico.....	18
2.4 O Efeito Estufa.....	20
2.5 Emissões antropogênicas.....	22
2.6 A importância das florestas.....	24
2.7 O CO ₂ no solo.....	25
2.8 Fluxo de CO ₂ e respiração do solo	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Coleta campus da UNESP – Rio Claro	27
3.2 A determinação do CO ₂ no solo.....	27
3.3 Método de análise de dados	29
3.4 Princípio de funcionamento do IRGA	30
3.5 Espectroscopia no infravermelho.....	31
3.6 O espectrofotometro	33
3.7 Analisador de gases por infravermelho – IRGA.....	35

3.7.1 Fonte infravermelha.....	38
3.7.2 Termistor.....	38
3.7.3 Detector duplo	39
3.7.4 Limpeza e calibração.....	41
3.7.5 Calibração.....	44
4 INSTRUMENTAÇÃO PARA COLETA DE DADOS.....	27
4.1 Descrição geral do sistema.....	46
4.2 Desenvolvimento do equipamento.....	48
4.2.1 Sistema de coleta de dados.....	50
4.2.1.1 Painel superior da maleta do analisador	53
4.2.1.2 Painel inferior da maleta do analisador	54
4.2.1.3 Painel traseiro.....	57
4.2.2 Procedimento de operação e uso	59
4.3 Sistema de controle e armazenamento de dados.....	59
4.4 Câmaras de coleta de fluxo de CO ₂ do solo	64
4.4.1 Câmara dinâmica.....	64
4.4.2 Câmara automática.....	64
5 RESULTADOS INICIAIS E DISCUSSÃO	66
6 CONCLUSÃO	76
7 RECOMENDAÇÕES.....	78
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

INTRODUÇÃO

Dentre os diversos gases que compõem a atmosfera terrestre, temos o CO₂ (dióxido de carbono, representando aproximadamente a proporção de 0,03% do seu volume [1]. O carbono é um elemento abundante no planeta e um dos principais componentes dos seres vivos e como importante regulador da temperatura do planeta.

O carbono está presente em diversos locais do nosso planeta, não apenas na atmosfera, mas também nos oceanos, solo, rochas sedimentares e principalmente nos combustíveis fósseis como o petróleo e o carvão mineral. De maneira geral podemos definir quatro grandes reservatórios de carbono existentes em nosso planeta, são eles a atmosfera, a litosfera e a hidrosfera e ecossistemas [2]. Tais depósitos, também chamados de “stocks”, trocam carbono entre si em um processo que mantém as concentrações de carbono atmosférico mais ou menos constantes. Diversos processos contribuem para a troca de carbono entre os diversos “stocks” de carbono, sendo um dos principais deles a atividade vegetal na superfície do planeta. Os vegetais são um dos grandes responsáveis pela captura e fixação do carbono na forma de biomassa, por meio da fotossíntese, especialmente durante o seu período de crescimento, quando a absorção de carbono é mais elevada. Da mesma forma que o carbono é capturado durante a fotossíntese, boa parte dele é liberado de volta a atmosfera pelo processo de respiração vegetal, e o saldo entre a fotossíntese e a respiração é conhecido como assimilação líquida de carbono entre o sistema solo-atmosfera [3].

Outro fator muito importante para se conhecer o balanço de carbono entre o sistema solo-atmosfera é representado pela respiração do solo, onde o carbono é liberado pelo solo devido a processos de respiração das raízes, decomposição da biomassa e de atividades microbiológicas em geral.

Todo esse processo de troca de carbono em nosso ecossistema, entre os diversos reservatórios existentes, é chamado de ciclo do carbono, e este passou a receber maior atenção a partir da década de 70, quando foi confirmado pelos

estudos de David Keeling no Havaí, que a concentração de gás carbônico na atmosfera estava crescendo.

A maior preocupação da comunidade científica quanto ao aumento dos níveis de carbono da atmosfera se deve ao fato de que o carbono é um dos principais gases ligados ao mecanismo natural de controle da temperatura do planeta, que conhecemos como efeitos estufa. Os gases estufa como o gás carbônico, são responsáveis pela retenção do calor existente no planeta, mantendo a temperatura do planeta dentro de um valor mais ou menos constante.

O aumento da concentração dos gases estufa, por conta das emissões antropogênicas desses gases, pode ser um dos grandes responsáveis pelo aumento da temperatura média do planeta e conseqüentemente pelas alterações climáticas observadas no planeta nos últimos anos.

Estudar o funcionamento de tais mecanismos e desenvolver métodos eficientes e precisos para a avaliação da emissão e concentração destes gases, em especial do dióxido de carbono, torna-se de vital importância para se avaliar e definir os rumos da atividade humana, no que diz respeito ao uso e cuidados com o meio ambiente.

1.1 Objetivos

Desenvolvimento da instrumentação necessária para se determinar o fluxo de CO₂ do solo para atmosfera, em campo. O equipamento foi feito a partir de um analisador de gás infravermelho modelo LI-840 (CO₂/H₂O) (LICOR In.), visando atender as necessidades para coleta de dados referentes ao fluxo de CO₂ de maneira prática e ao mesmo tempo sendo uma opção de baixo custo, montado a partir de materiais de fácil acesso disponíveis no mercado nacional, integrando todos os dispositivos acessórios necessários a sua utilização, de maneira a dar maior mobilidade ao sistema e permitir o seu uso e operação em campo. O estudo dos fluxos relativos aos tipos de solo e a sua relação com a sazonalidade não estão dentro dos objetivos deste projeto, principalmente em função do tempo necessário para tais estudos, que iria além do tempo disponível para o desenvolvimento deste

mestrado. Assim, a coleta de dados e análise dos fluxos tem como objetivo principal a avaliação da instrumentação desenvolvida, quanto ao seu funcionamento e eficiência.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 O ciclo do carbono

Existem basicamente duas formas de carbono, uma orgânica, proveniente de toda a matéria orgânica existente, os seres vivos, e outra forma, a inorgânica, presente nas rochas. Todo o carbono existente no planeta se encontra armazenada em grandes reservatórios, também chamados de “stocks de carbono”, ou simplesmente “stocks”. Podemos definir quatro grandes “stocks” de carbono, sendo eles: os oceanos, a atmosfera, as formações geológicas e os ecossistemas terrestres. O carbono existente nestes diversos grandes reservatórios então em constante fluxo, migrando lentamente de um “stock” para o outro por meio do chamado ciclo do carbono. Este ciclo pode ser dividido em ciclo “lento” que é composto pelo fluxo de carbono existente em formações geológicas e o fluxo “rápido”, representado pela ação biológica dos ecossistemas. [2]

2.2 O ciclo geológico

O ciclo geológico é considerado lento, pois as trocas de carbono entre ele e os demais reservatórios se dá em uma escala de milhares de anos, sendo constituído basicamente por carbono inorgânico presente nas rochas sedimentares ou na forma de combustíveis fósseis. O fluxo de carbono entre os diversos “stocks” tem controlado a concentração de CO₂ existente na atmosfera a milhares de anos. Após o início da Revolução industrial a atividade humana passou a causar grande impacto no meio ambiente, com o desequilíbrio natural existente entre os grandes reservatórios de carbono. A emissão de milhares de toneladas de carbono para a

atmosfera, resultantes da queima de combustíveis fósseis para uso industrial e residencial teve como consequência direta o aumento da concentração deste gás na atmosfera [2].

2.3 O ciclo biológico

Já o ciclo biológico é considerado extremamente rápido se comparado ao ciclo geológico. Estimativas indicam que a renovação do carbono atmosférico ocorre a cada 20 anos, de forma que se não houvesse a sua reposição, este gás estaria completamente esgotado em cerca de 20 anos apenas. Assim, os ecossistemas existentes no planeta desempenham um importante papel para o fluxo de carbono entre os “stocks”, principalmente devido aos processos de respiração e fotossíntese [4].

O carbono é fundamental a vida no planeta, sendo absorvido pelos ecossistemas existentes, especialmente pelo processo de fotossíntese vegetal, onde o CO_2 é absorvido da atmosfera pelos vegetais na presença de luz, sendo assimilado a biomassa vegetal. Este processo é de fundamental importância para manutenção da vida no planeta pois é por intermédio da fotossíntese realizada pelos vegetais que são produzidas substâncias mais elaboradas como a glicose, rica em energia e vital para toda a cadeia alimentar. Por este motivo definimos os vegetais fotossintetizantes como seres produtores dentro dessa cadeia [5].

Como resultado da fotossíntese temos a liberação de O_2 em quantidade proporcional ao de CO_2 absorvido pelo vegetal. Na ausência de luz, um processo inverso acontece, o da respiração, onde os vegetais absorvem O_2 presente na atmosfera para que juntamente com a glicose produzida durante a fotossíntese, seja produzida a energia necessária a manutenção da vida [5].

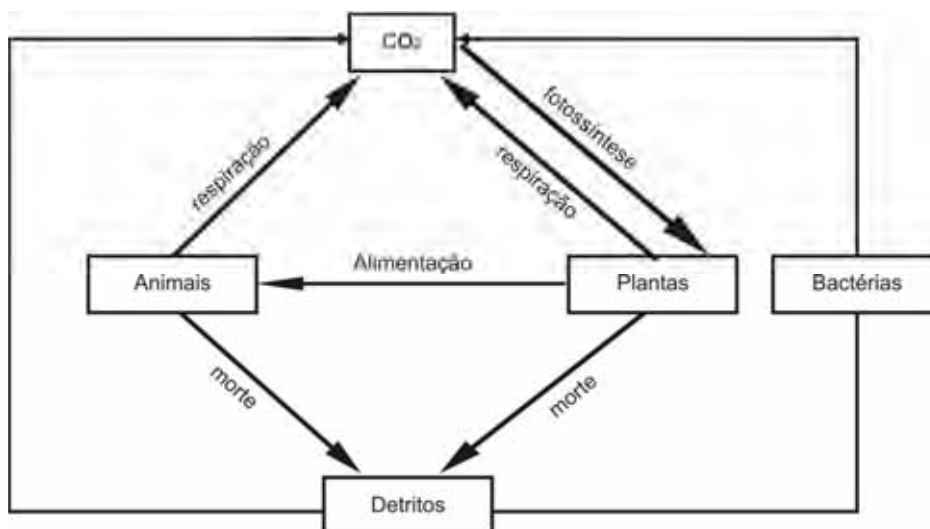


Figura 1: Ciclo do carbono

Este processo é fundamental para o ciclo do carbono, figura 1, onde o carbono é absorvido pelas plantas e finalizado pelos decompositores, reiniciando todo o processo, com a devolução de todos os nutrientes para o meio ambiente.

Por meio da curva de Keeling, figura 2, é possível verificar que a maior troca entre o “stock” terrestre e “stock” atmosférico se dá em função dos processos da fotossíntese e da respiração existente na superfície do planeta. Devido à declinação da Terra e a distribuição desigual da vegetação nos hemisférios, existe uma flutuação ao longo do ano a qual é visível nos diversos gráficos da variação da concentração anual do CO₂. Durante o período de verão, em função da abundância de luz solar, a fotossíntese nessas regiões é maior do que nos períodos de inverno, fazendo com que os níveis de CO₂ presentes na atmosfera sejam mais baixos durante o verão. Como a maior parte da vegetação do globo está concentrada no hemisfério norte, isso faz com que os níveis mais baixos de CO₂ registrados na atmosfera ocorram durante o período de verão nesse hemisfério, como pode ser observado na curva de Keeling [6]

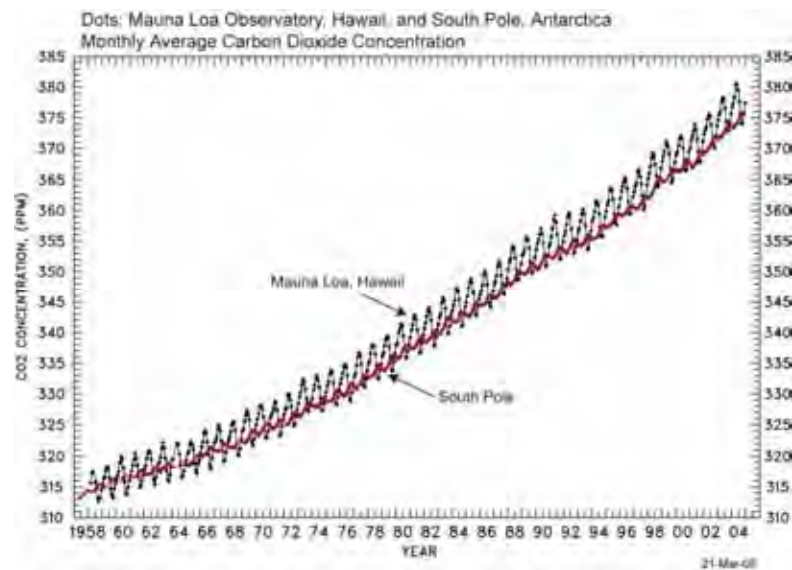


Figura 2: Curva de Keeling, concentração atmosférica de CO₂ medidas em Mauna Loa [6].

2.4 O Efeito Estufa

A atmosfera da terrestre desempenha diversas funções fundamentais para a vida existente em nosso planeta, não apenas pela sua composição e a presença de gases como o oxigênio, indispensável a vida, mas também pelo seu papel de filtro protetor das radiações vindas do espaço e que atingem a Terra constantemente. Além dessa proteção indispensável, a atmosfera também se comporta como uma manta térmica, permitindo que a temperatura média do planeta se mantenha constante dentro de valores adequados a manutenção da vida. Processo esse que chamamos de efeito estufa [5].

Ao contrário do que muitos pensam, o efeito estufa não é um fenômeno artificial, consequente da ação humana no planeta, mas é um fenômeno natural que ocorre na atmosfera em função da presença de certos gases. A atmosfera é constituída principalmente pelos gases nitrogênio, oxigênio e argônio, que apresentam uma baixa interação com a radiação emitida pelo Sol e pela radiação infravermelha emitida pela Terra. No entanto, estes não são os únicos gases existentes na atmosfera, que apresenta traços de diversos outros gases como o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e ozônio (O₃), os quais são denominados de efeito estufa, pois interagem fortemente com a radiação

infravermelha. Mesmo ocupando menos de 0,1% do volume total da atmosfera, estes gases apresentam um importante papel no balanço energético terrestre. A terra recebe grande quantidade de energia proveniente da radiação solar, que atinge a sua superfície e posteriormente é reemitida para o espaço na forma de radiação infravermelha. Devido a sua capacidade de interação com a radiação infravermelha, os gases de efeito absorvem boa parte da energia infravermelha emitida pela superfície da Terra, reemitindo parte dessa energia de volta para o planeta. Esse processo de absorção e emissão de radiação infravermelha tem como consequência o aumento da temperatura do planeta, resultando no feito ao qual chamamos de efeito estufa [2].

Devido ao aumento da emissão de gases estufa pela atividade humana, esta contribuição tem se tornado alvo de grande discussão pela comunidade científica, onde a queima de combustíveis fósseis e o uso inadequado do solo tem sido considerados como alguns dos grandes responsáveis pela elevação da concentração deste gás na atmosfera. Tem se estudado exaustivamente soluções para o problema, medidas de contenção das emissões e a melhor administração das reservas naturais, com o uso adequado do solo pela agricultura a fim de minimizar a emissão de CO₂ e investimento e cuidados das reservas florestais, considerados grandes sequestradores de CO₂ [2].

Em 1958 o cientista Charles David Keeling (oceanógrafo do Scripps Institute of Oceanography), iniciou uma série de experiências no monte Mauna Loa, Havaí, que lhe permitiu medir, com bastante precisão, a concentração de CO₂ na atmosfera.

Apesar do stock atmosférico de carbono ser o menor dos três (com cerca de 750 Gt de carbono), este “stock” determina a concentração de CO₂ na atmosfera, cuja concentração pode influenciar o clima terrestre [6].

Somente a partir dos anos 70 que questões relativas a aos danos causados pela ação do homem começaram a ser levados em consideração, quando a comunidade científica passou a divulgar os dados referentes de destruição da camada de ozônio que protege o planeta da radiação ultravioleta. Durante a Conferência da Convenção do Clima, realizada em 1997, foi assinado o Protocolo de Quioto, onde foi estabelecido que o aquecimento global seria controlado pela redução das emissões dos gases de efeito estufa. Estima-se que o CO₂ é responsável por volta de 60% do efeito estufa, com a previsão de que os atuais 380 ppm de CO₂ na atmosfera poderão chegar até 540 ppm nos próximos 50 anos [5].

2.5 Emissões antropogênicas

O ciclo natural do carbono é muito complexo e o carbono armazenado em quantidades diferentes nos diversos “stocks” sofrem variações em escalas de tempo diferentes. A grande maioria deste carbono está armazenado no solo na forma de depósitos fósseis, estimados em 4.000 a 10.000 Gt de carbono, e por estarem armazenados não são computados no ciclo rápido do carbono [2]. A troca de carbono entre este reservatório e os demais ocorrer de milhões de anos, principalmente por meio de processos climáticos, erosão e sedimentação.

O “stock” terrestre é muito estável e a troca mais significativa de carbono se dá por meio da vegetação terrestre e marinha existente nos oceanos. O dióxido de carbono é altamente solúvel na água do mar, possuindo o mar cerca de cinquenta vezes mais carbono do que a atmosfera [7].

As trocas de carbono entre os diferentes reservatórios existentes não são constantes e podem sofrer variações em resposta ao próprio clima. Apesar das grandes variações naturais ocorrida nos níveis de CO₂ na atmosfera ao longo dos últimos 12.000 de anos, a partir do final da última era glacial até o surgimento da era industrial, os níveis de CO₂ variaram de 260 a 280 ppm. Isto pode ser constatado pela análise de traços desses gases encontrados em bolhas de ar presas em geleiras antigas. Assim foi possível perceber que a relativa estabilidade dos níveis atmosféricos de CO₂ sofreu um fim abrupto com o início da era industrial, momento em que passamos a transferir para a atmosfera toneladas de CO₂ que estavam armazenadas nos “stock” terrestres a milhares de anos. Assim, o carbono de origem antropogênica tem causado uma perturbação abrupta no ciclo natural do carbono, causando vários desequilíbrios, uma vez que a clima do planeta ainda não teve tempo suficiente para responder a essas mudanças e interagir com essa nova fonte de carbono. O carbono de origem antropogênica é considerada a maior fonte de perturbação do ciclo do carbono. Os ventos e a turbulência existente na atmosfera ocorrem em uma velocidade maior do que o aumento dos níveis de CO₂, de modo que este se encontra em concentrações relativamente uniformes, variando em apenas algumas partes por milhão entre o hemisfério sul e norte. Por conseguinte, a partir de uma rede dispersa de estações de controle e monitoramento na superfície do planeta é suficiente para estimar as concentrações desse gás na atmosfera. As concentrações de CO₂ antes de 1950 puderam ser estimadas pela análise de

amostras de ar armazenadas em bolhas de ar presas em geleiras antigas. Tomados em conjunto, os dados obtidos mostram que os níveis de CO₂ têm aumentado progressivamente ao longo da era industrial. Cerca de 50 por cento do aumento dos 280 ppm antes da era industrial aos atuais 380 ppm ocorreu nos últimos 30 anos [7].

O ciclo global do carbono é um processo complexo e composto por diversas variáveis. O estudo das mesmas tem por objetivo melhorar o entendimento deste processo, e se obter maior precisão dos modelos existentes para determinar da melhor maneira possível a participação das emissões antropogênicas neste ciclo.

Mesmo com todas as incertezas existentes, algumas conclusões podem ser obtidas, sendo a principal delas o fato de que a retirada maciça do carbono armazenado nos diversos depósitos, em especial dos depósitos fósseis a uma taxa muito maior do que a capacidade de reabsorção pelo próprio ciclo tem causado o aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera. É muito provavelmente acarretado as mudanças climáticas globais observadas. Outra conclusão importante diz respeito ao elevado potencial que algumas florestas possuem para capturar carbono da atmosfera, aumentando consideravelmente a importância do cuidado e manutenção dos ecossistemas naturais com grande biomassa, visando o uso de florestas como sumidouros de carbono a médio e longo prazo, e não se tornarem fontes de emissão de carbono. Entender o ciclo global do carbono e a influência que as atividades humanas têm sobre ele será decisivo na formulação de políticas públicas quanto ao uso do solo e preservação dos ecossistemas existentes. Reduzir a emissões de CO₂ frente à necessidade de produção de energia necessária ao desenvolvimento tem se mostrado um grande desafio, que não poderá ser superado com sucesso sem formulação de políticas públicas e a conscientização da sociedade quando a este tema [5].

2.6 A importância das florestas

Depois de constatado pela comunidade científica o crescimento dos níveis de CO₂ na atmosfera e a sua influência sobre a temperatura do planeta, com os dados obtidos por David Keeling na ilha de Mauna Loa no Havaí [6], a primeira reação frente a este problema foi a necessidade de contenção das emissões dos gases de efeito estufa, especialmente o CO₂, emitidos por indústrias, veículos e a queima de combustíveis fósseis em geral, e por práticas agrícolas como as queimadas. No entanto, hoje, outros métodos para redução dos níveis de CO₂ têm sido estudados, especialmente no que diz respeito ao investimento e a criação de sumidouros desses gases. Podemos entender como sumidouro qualquer sistema com um elevado potencial de absorção dos gases desejados. Desta forma, as florestas têm sido estudadas com o objetivo de serem usadas como sumidouros naturais de CO₂, absorvendo mais CO₂ do que liberam, contribuindo assim para a contenção do efeito estufa [1].

Dentre as muitas variedades de árvores existentes, o eucalipto tem se mostrado um excelente sequestrador de CO₂, uma vez que esta espécie apresenta uma grande eficiência na captura e estoque do carbono em sua biomassa, especialmente em locais com abundância de luz e água. O eucalipto também apresenta outras características que fazem dele uma boa escolha. Entre elas o fato de apresentar um rápido crescimento e assim uma alta produtividade, sendo uma das principais fontes de matéria prima para a indústria de papel. Em geral, o cultivo de eucalipto se dá em ciclos de sete anos desde o plantio até a colheita, o que contribui muito para a escolha desta árvore como sequestrador de carbono, pois é justamente durante o seu crescimento que a árvore mais absorve carbono e o incorpora a sua biomassa. Assim, como as árvores não absorvem as mesmas quantidades de carbono durante a sua vida, as plantações de eucalipto se mostram melhores sequestradores de carbono do que as florestas nativas, já desenvolvidas [19].

2.7 O CO₂ no solo

O solo não é uma massa totalmente compacta, mas apresenta porosidade, de acordo com cada tipo de solo. Os poros do solo são, em sua grande parte, ocupados pelo ar e pela água. O preenchimento dos poros do solo pelo ar também é conhecido como fase gasosa do solo e sua composição difere muito pouco do ar atmosférico, sendo composta principalmente por N₂, O₂, vapor de água e CO₂, com traços de outros gases [8].

Tabela 1 – Composição média do ar do solo e da atmosfera [8].

<i>Componente</i>	<i>Solo (%)</i>	<i>Atmosfera (%)</i>
N ₂	79	78
O ₂	20	21
CO ₂	0,25	0,03
Outros	0,75	0,97

Em florestas, e solos ocupados por culturas vegetais, a produção de CO₂ se dá especialmente pela respiração do solo, e os fluxos de CO₂ para fora do solo dependem diretamente das características do solo, sejam elas físicas, químicas ou biológicas. As florestas possuem uma grande importância nos balanços de carbono na atmosfera uma vez que atuam como grandes fontes e sumidouros de vários tipos de gases, em especial o CO₂ [4].

Este fato pode ser claramente percebido pela flutuação anual da concentração de CO₂ observada na curva de Keeling. Desta forma, conhecer entender melhor o papel das florestas nesse processo, em especial no que diz respeito à respiração do solo é especialmente importante para compreensão do balanço de carbono global e a importância das florestas como sequestradores deste gás. Além da participação dos próprios vegetais na produção de CO₂ do solo pela respiração das raízes, a produção deste gás se dá pela ação dos microrganismos existentes no solo responsáveis pela decomposição da matéria orgânica ali presente. Todo esse processo é conhecido como respiração do solo e está fortemente condicionado a fatores ambientais como temperatura, pressão e umidade do solo e sua variação,

uma vez que este tem forte influência sobre os processos químicos que ocorrem no solo [4].

Desta forma, os solos que apresentam níveis de temperatura e umidade elevadas, apresentam condições muito favoráveis à produção de CO₂ pela decomposição da matéria orgânica pela atividade microbiana e pela respiração das raízes. Como a respiração do solo é influenciada por fatores ambientais como temperatura e umidade, os fluxos de CO₂ do solo podem variar de acordo as estações do ano o que tem sido observado e estudado em diversos trabalhos [4].

2.8 Fluxo de CO₂ e respiração do solo

Para se conhecer os fluxos de carbono emitidos pela superfície do solo para a atmosfera é necessário quantificarmos a emissão deste gás. A determinação desse fluxo é um dos métodos mais usados para se conhecer a respiração do solo em um determinado local, isso porque respiração do solo e fluxo de CO₂ do solo não se trata da mesma coisa. Como respiração do solo entende-se os processos que ocorrem no solo tais como a decomposição da matéria orgânica pela comunidade microbiana e a respiração das raízes, principalmente. Já o fluxo de CO₂ é representado pela liberação desse gás para fora do solo, que é capaz de estocar uma concentração de duas a três vezes mais CO₂ do que o existente na atmosfera. No entanto, este CO₂ não fica retido no solo, mas a maior parte é liberada para atmosfera. O conhecimento da respiração do solo é um fator importante para o conhecimento e determinação do fluxo líquido de CO₂ de um ecossistema, assim como também o conhecimento da influência das variáveis que afetam esse processo, como a temperatura e a umidade [4].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Coleta no campus da UNESP – Rio Claro

Neste local, figura 4, foram realizadas as coletas iniciais de teste do equipamento, e onde foi coletada a primeira sequência de medidas de fluxo, para avaliação do equipamento e a título de comparação com outros dados futuramente coletados em outros pontos, inclusive na UNESP.



Figura 3: Campos da UNESP de Rio Claro e a localização do primeiro ponto de coleta de dados

3.2 A determinação do CO₂ no solo

Existem vários métodos para se determinar o fluxo de CO₂ do solo, entre eles dois métodos são muito usados, o de covariância dos vórtices turbulentos, que é um sistema aberto, e o sistema fechado, que é um método que se utiliza de câmaras dinâmicas fechadas colocadas sobre o solo.

O método de covariância necessita de uma grande infraestrutura para sua aplicação, além da necessidade de um período maior de coleta do que o método de câmara para obtenção de dados consistentes, sendo este método mais indicado quando se deseja determinar fluxos líquidos de CO₂ de um ecossistema.

O método de câmara dinâmica determina o fluxo de CO₂ emitido baseado na variação de concentração dos gases emitidos pelo solo no interior da câmara, figura

5, e em seguida quantificados [4]. Este método é mais indicado quando se deseja determinar os fluxos de CO_2 do solo e por este motivo é o método empregado neste trabalho.

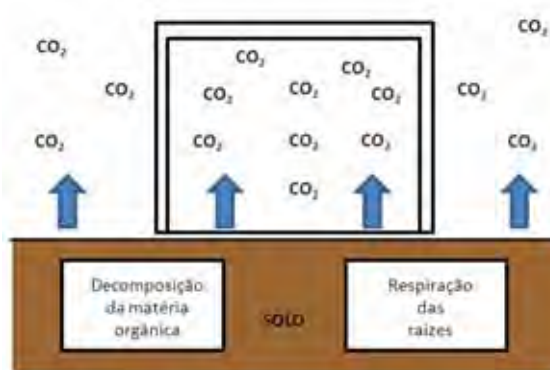


Figura 4: Câmara dinâmica sobre o solo.

A quantificação da concentração no interior da câmara pode ser feita pela coleta direta de amostras do ar contido no interior da câmara por meio de seringas, e analisados posteriormente, ou diretamente, pela utilização de analisadores de gás infravermelho, também conhecidos como IRGAS, do inglês, Infra Red Gas Analyser.

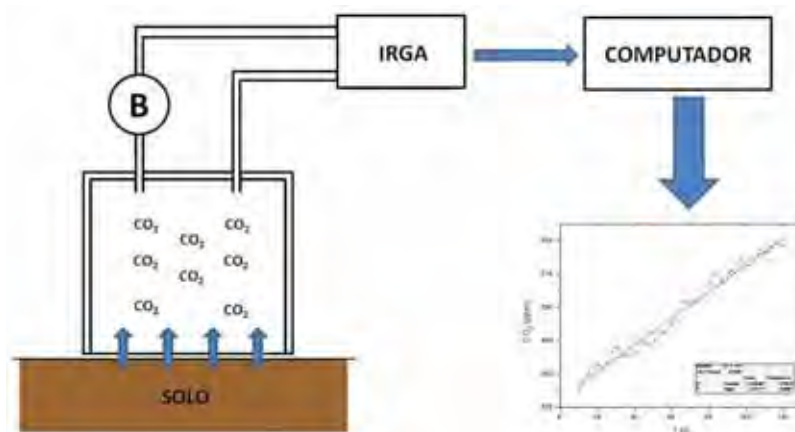


Figura 5: Câmara dinâmica em conjunto com um analisador de gás infravermelho (IRGA) e uma bomba (B) para forçar a circulação do gás pelo IRGA.

O uso de IRGAS, juntamente com câmaras dinâmicas tem se tornado um método muito usado na determinação de fluxos de CO₂ do solo, oferecendo diversas vantagens, entre elas o reduzido tempo para determinação de medidas, cerca de 2 a 10 minutos para cada coleta e o fato dos valores da concentração de CO₂ serem determinados imediatamente, eliminando a necessidade da coleta de amostras para posterior análise. Isso permite que uma grande quantidade de dados possa ser coletada em um período de tempo relativamente curto. Deste modo, a determinação do fluxo de CO₂, tanto para ambientes florestais quanto agrícolas com o uso de IRGAs tem se mostrado uma opção interessante devido ao seu custo relativamente baixo, em comparação a outros equipamentos, e ao seu tamanho reduzido e a facilidade de operação tem permitido que ele fosse levado a campo, tornando-se uma das formas mais diretas na determinação do fluxo de CO₂ do solo [4].

3.3 Método de análise de dados

O fluxo **Rs** devido à respiração do solo é calculado com a taxa de variação de concentração de CO₂ dentro do volume de controle da câmara por unidade de tempo e área sobre a região coberta pela câmara, tal que [9]:

$$R_s = \frac{(C_n - C_{m1})}{\Delta t} \left(\frac{V}{A} \right) \left(\frac{P}{RT} \right) \quad (1)$$

onde,

C_n = concentração de CO₂ (ppm);

Δt = variação do tempo associada à variação da concentração (s);

P = pressão do ar (Pa);

T = temperatura do ar (K);

R = constante específica do gás (8,314 J mol⁻¹ K⁻¹);

V = volume da câmara (m³);

A = área de cobertura horizontal da câmara (m²);

Rs = Fluxo de CO₂ (μ mol m⁻² s⁻¹)

3.4 Princípio de funcionamento do IRGA

Para entendermos o que é luz, podemos descrever seu comportamento como a de partículas e ondas. Composta por campos elétricos e magnéticos, as ondas luminosas podem ser representada como ilustrado na figura 7, onde temos a representação de uma onda luminosa típica.

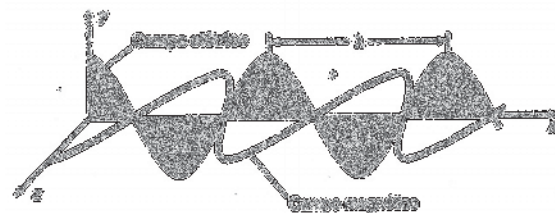


Figura 6: Representação de uma onda eletromagnética plano-polarizada de comprimento de onda λ [10].

Dentre as propriedades mais importantes que caracterizam uma onda eletromagnética com a luz está a frequência e o comprimento de onda. Podemos definir a frequência, representada pela letra grega ν (mi), como o número de oscilações completas que a onda executa no tempo de um segundo. A unidade de medida para frequência geralmente é o hertz (Hz), mas espectroscopia na unidade normalmente utilizada para a frequência é o **segundo recíproco**, s^{-1} . Já o comprimento de onda é definido como a distância entre dois pontos equivalentes de dois ciclos completos consecutivos, por exemplo, a distância entre duas cristas de onda. Com base nas definições de frequência e comprimento de onda podemos definir a relação entre essas duas grandezas como [10]:

$$v\lambda = c \quad (2)$$

sendo, c a velocidade da luz, ($2,998 \times 10^8$ m/s no vácuo), para um feixe de luz que se propaga pelo vácuo, caso contrário a velocidade de luz será dada como c/n , onde n é o índice de refração do meio percorrido pelo feixe. Quando pensamos na energia de uma onda luminosa, é mais conveniente tratar a luz em termos de fótons, ou seja, tratar a luz com um comportamento típico de partículas, onde a energia representada por cada fóton é dado por

$$E = hv \quad (3)$$

sendo h é a constante de Planck ($h = 6,626 \times 10^{-34}$ J . s). A partir das equações (1) e (2) podemos dizer que a energia é proporcional a frequência.

$$E = hc / \lambda = hc \tilde{\nu} \quad (4)$$

onde $\tilde{\nu}$ ($= 1/\lambda$) e é chamado de número de onda, assim, podemos ver que a energia é inversamente proporcional ao comprimento de onda e diretamente proporcional ao número de onda. A unidade de comprimento de onda é o metro recíproco, m^{-1} , porém é mais comum na literatura o uso do cm^{-1} , lido como “centímetro recíproco” ou “número de onda”, especialmente quando se tratará de espectroscopia. As diversas regiões do espectro eletromagnético, figura (8), foram definidas em função de algumas de suas propriedades características e os nomes das regiões possuem apenas natureza histórica. É importante lembrar que não existem mudanças radicais nas características da radiação eletromagnética ao passarmos de uma região para outra [10].

3.5 Espectroscopia no infravermelho

A espectroscopia é um método usado para se obter dados referentes a amostras irradiadas por determinados comprimentos de onda, onde a interação da entre as moléculas ou partículas com a luz irradiada sobre elas é estudada. Ao ser exposto a uma fonte de radiação eletromagnética, o composto orgânico absorve certos comprimentos de onda que incidiram sobre ele, posteriormente transmitindo essa energia absorvida em outros comprimentos de onda, e por meio desse processo podemos determinar o que chamamos de espectro de absorção. A energia absorvida pela molécula se distribui por esta, causando efeitos como estiramento ou deformação angular das ligações químicas, podendo também forçar os elétrons a pular de orbitais de energia mais baixa para orbitais de energia mais alta. Os efeitos obtidos estão diretamente relacionados as características de frequência da radiação absorvida pela molécula, de modo que informações sobre a estrutura da molécula podem ser assim obtidas [11].

E espectroscopia no infravermelho se utiliza da absorção da radiação infravermelha para analisar os compostos estudados, em especial no comprimento de onda do infravermelho próximo, que são muito úteis no estudo de compostos formados por hidrogênio e carbono ou oxigênio e nitrogênio [12].

Ao absorver um fóton, a energia da molécula aumenta, passando para um estado excitado, e em seguida passa a emitir esse fóton, perdendo energia e voltando ao estado que chamamos de estado fundamental. Na figura 8 temos o espectro eletromagnético e a representação dos diversos efeitos sobre uma molécula ao absorver determinados comprimentos de onda [10].

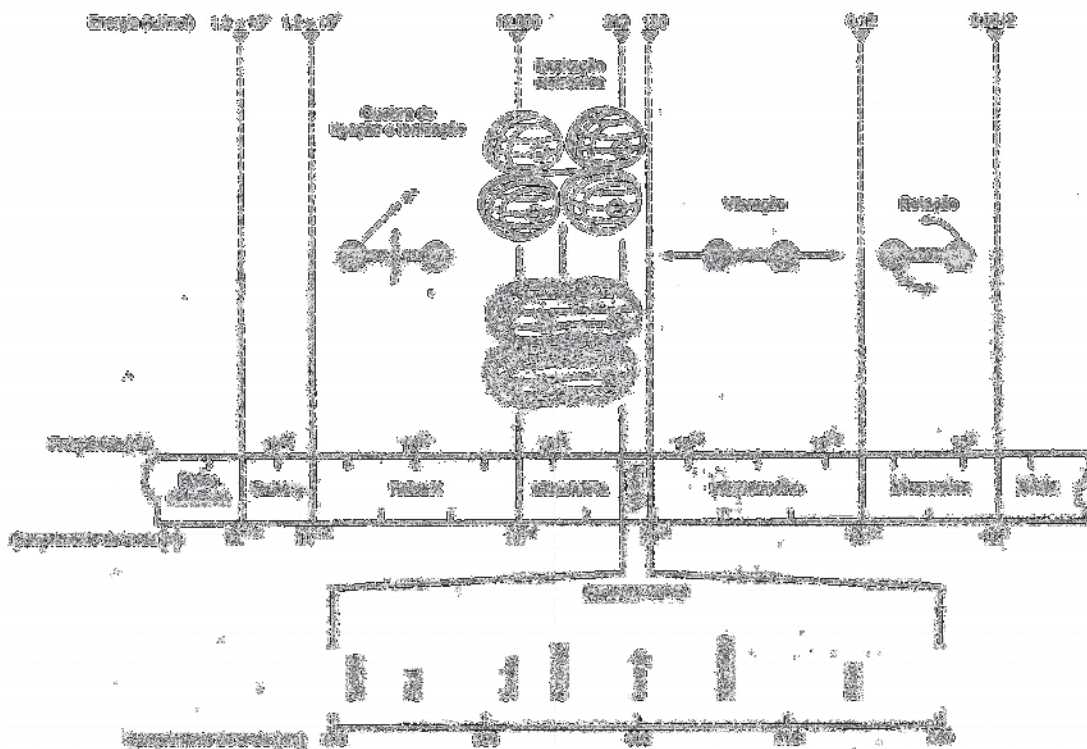


Figura 7: Espectro eletromagnético e seus respectivos comprimentos de onda, assim como também os efeitos sobre as moléculas quando a luz é absorvida por elas em cada região do espectro [10].

3.6 O espectrofotômetro

Imaginemos uma determinada amostra sendo irradiada como um feixe de luz, cuja intensidade chamaremos de P_0 . Quando as moléculas da amostra apresentam energia de vibração incompatível com a energia dos fótons, nenhuma energia é absorvida e todos os fótons passam pela amostra. O feixe irradiado que sai da amostra terá a neste caso a mesma intensidade do feixe incidente $P_0 = P$. Da mesma forma, se a energia dos fótons da luz irradiada sobre a amostra for compatível com a energia vibracional das moléculas da amostra, estas irão absorver os fótons, aumentando assim o seu movimento vibracional, e conseqüentemente, a intensidade do feixe incidente será reduzida após sair da amostra. Ou seja, a intensidade do feixe de fótons que deixa a amostra terá uma intensidade menor do que a intensidade incidente inicialmente ($P_0 > P$), isso porque parte dos fótons foi absorvida pela amostra. Assim, quanto maior número de moléculas com energia

vibracional compatível com a energia irradiada sobre a amostra, menos será a intensidade final do feixe após emergir da amostra [10].

Podemos representar este processo da seguinte maneira:

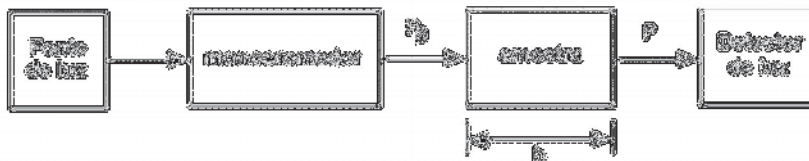


Figura 8: Diagrama esquemático de um sistema de espectroscopia de feixe simples [10].

Antes de incidir sobre a amostra, figura 9, a luz passa por um monocromador (que pode ser um prisma, uma rede de dispersão, ou um filtro) que seleciona o comprimento de onda da luz desejado. Após sair do monocromador, a luz pode ser composta por um único comprimento de onda, e neste caso é denominada monocromática, que significa “de uma cor”, ou melhor dizendo, de um único comprimento de onda. Essa luz, com energia radiante, que é a energia por unidade de tempo por unidade de área no feixe de luz (watts por metro quadrado, W/m^2) atinge a amostra com uma intensidade P_0 , sai do outro lado da amostra com uma intensidade P após passar pelo comprimento b da mesma. Caso alguma quantidade de luz seja absorvida pela amostra, teremos que $P < P_0$. A transmitância, T , poderá ser então definida como a fração da luz que passa pela amostra [10]:

$$T = P / P_0 \quad (5)$$

A transmitância T está entre 0 e 1, sendo que a transmitância percentual é simplesmente $100T$ e fica entre 0 e 100%.

A absorvância será definida como:

$$A = \log_{10}\left(\frac{P_0}{P}\right) = -\log T \quad (6)$$

Quando nenhuma luz é absorvida, $P = P_0$ e $A = 0$.

Por exemplo, digamos que 90% da luz foi absorvida, neste caso, 10% é transmitida e $P = P_0/10$, onde essa razão dará $A=1$. Da mesma forma, digamos que apenas 1% da luz é transmitido, então $A=2$. A absorvância apresenta uma importância muito grande pois a concentração c de uma determinada substância absorvente em uma amostra é diretamente proporcional a ela. A equação 7 é muito importante em espectrofotometria aplicada à identificação de elementos, e é chamada de Lei de Beer-Lambert, ou lei de Beer [10]

$$A = \epsilon bc \quad (7).$$

A concentração c da amostra é dada em unidades de mol por litro (M) e o caminho óptico b em centímetros. Já a grandeza ϵ (épsilon) é chamada de absorvidade molar, e é dado em $M^{-1}cm^{-1}$ para que o produto ϵbc seja adimensional. A absorvidade molar nos indica a quantidade de luz absorvida num determinado comprimento de onda e é característica de uma dada substância [10].

3.7 Analisador de gases por infravermelho – IRGA

O dióxido carbônico, por ser um gás composto por moléculas diatômicas heterogêneas, formadas por dois átomos diferentes, absorvendo na faixa de

comprimentos de onda do infravermelho, em torno do comprimento de onda (λ) de $4,25 \mu\text{m}$ ($\lambda^{-1} \approx 2353 \text{ cm}^{-1}$). O analisador de gases infravermelho (IRGA), basicamente é composto por um emissor de infravermelho, uma célula de medição, também chamada de caminho óptico, um filtro óptico e um detector. O sinal de infravermelho proveniente da fonte atravessa a célula de medição onde se encontra a amostra de gás a ser analisada. As moléculas de CO_2 irão absorver energia correspondente à faixa de infravermelho de forma proporcional a sua concentração na amostra. Isso irá causar uma atenuação do sinal que sai da célula de medição e atinge o detector, que então enviará um sinal correspondente a concentração do gás ao circuito de processamento. Entre a célula de medição e o detector temos um filtro, necessário para que se selecione a faixa de comprimento de onda específica que atinge o detector [13].

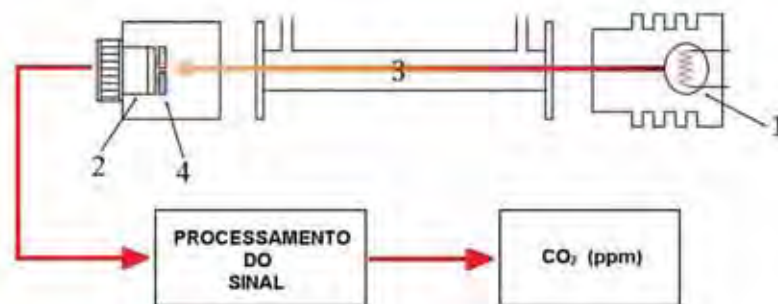


Figura 9: Composição básica do IRGA. 1. Fonte de infravermelho, 2. Detector duplo, 3. Célula de amostra (caminho óptico), 4. filtro.[14]

O equipamento que usamos neste trabalho é um analisador de gás infravermelho produzido pela Licor, modelo LI-840, figura 11, capaz de detectar as concentrações tanto de CO_2 quanto de H_2O presentes na amostra. O LI-840 é um analisador de gás infravermelho Não-Dispersivo (NDIR em inglês). Neste tipo de equipamento, existem filtros ópticos que limitam a faixa do espectro analisado, de modo a reduzir ao máximo a interferência de outros gases, em especial daqueles com valores de absorção muito próximos um do outro. Como por exemplo, o dióxido de carbono, que possui sua maior faixa de absorção em torno de um comprimento de onda de $4,25 \mu\text{m}$ ($\lambda^{-1} \approx 2353 \text{ cm}^{-1}$) e o do vapor de água em $2,59 \mu\text{m}$ ($\lambda^{-1} \approx 3861 \text{ cm}^{-1}$). O filtro é composto por camadas porosas de silicone com índices de refração diferentes, de

forma a permitira propagação apenas dos comprimentos de onda desejados, que irão atingir o detector [1].



Figura 10: LI-840, CO₂/H₂O Gas Analyser da Li-Cor In. [14]

O transdutor é composto de uma fonte de infravermelho, formada por uma lâmpada de tungstênio montada em um refletor parabólico para colimar a luz e aumentar a taxa de transferência de energia que passa pelo caminho óptico, representado na figura 12, um detector piroelétrico duplo e um termistor que monitora a temperatura interna. Tanto o refletor parabólico quanto o caminho óptico são banhados a ouro para aumentar a transmissão de energia [14].



Figura 11: Caminho óptico do analisador LI-840.

3.7.1 Fonte infravermelha

A fonte de radiação infravermelha é formada por uma lâmpada de filamento de tungstênio, figura 13, e por este motivo, a fonte é sensível a vibrações mecânicas, podendo ser danificada por vibrações fortes ou movimentos bruscos [1].

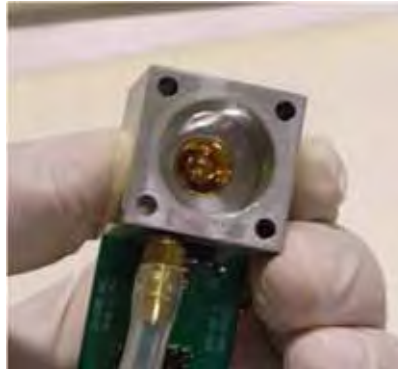


Figura 12: Fonte infravermelha.

3.7.2 Termistor

A célula de medição possui um sensor responsável pelo monitoramento da temperatura dentro da cavidade ótica, o termistor. Este termistor fornece informações a respeito da temperatura, permitindo sua compensação com o objetivo de mantê-la sempre constante. A importância de se manter a temperatura dentro de certos valores se deve ao fato de que, componentes como os filtros óticos, serem sensíveis a variações de temperatura [1].

Por este motivo, o sistema possui um termostato que mantém a temperatura constante de 51.9°C. Os termistores são monitorados como parte da malha de controle para determinar as correções necessárias no equilíbrio térmico. O caminho óptico está em contato com a caixa do detector, e assim, atinge o equilíbrio térmico, diminuindo a probabilidade de condensação de água dentro da cavidade, evitando assim efeitos indesejáveis que a umidade poderia causar sobre o desempenho do equipamento, como o comprometimento da transmissão do sinal pelo caminho óptico, principalmente, o que poderia até mesmo danificar permanentemente o próprio caminho [14].

3.7.3 Detector duplo

A detecção de IR do LI-840 é realizada por dois pares de fotodetectores, cada um contendo dois detectores piroelétricos e seus elementos ópticos, figura 15, que fornecem dois sinais distintos referentes ao sinal infravermelho detectado. Os dois sinais são chamados de sinal ativo e sinal de referência. O sinal ativo diminui na presença do gás, já sinal de referência não sofre nenhuma alteração na presença do gás a ser medido, monitorando a intensidade da fonte, tal como esta representado na figura 14a [1]. Ambos os detectores possuem filtros ópticos, responsáveis pela seleção de comprimentos de onda específicos a cada um, um associado ao detector ativo e outro ao detector de referência. Assim, filtro associado ao detector ativo transmite radiação na faixa que é absorvida pelo dióxido de carbono e o filtro associado ao detector de referência transmite radiação na faixa de comprimentos de onda que não são afetados pelo CO_2 [1]. Outro conjunto de filtros é responsável pelo mesmo procedimento em relação ao H_2O .

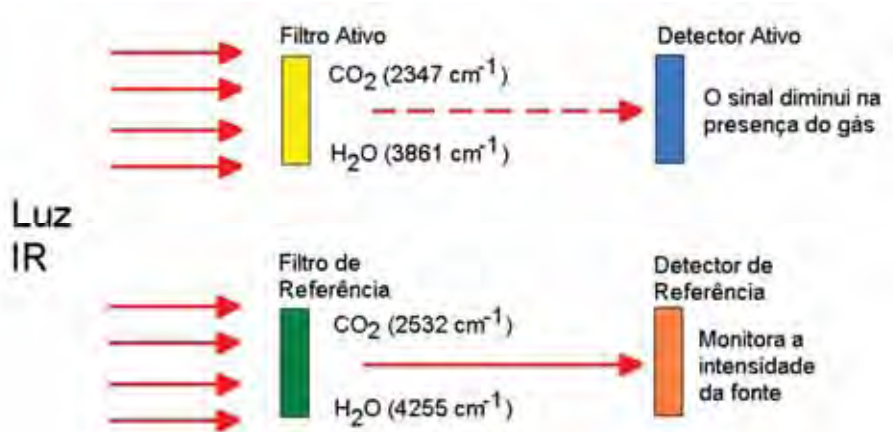


Figura 13a: Diagrama de funcionamento do detector duplo [14]. b) Aspecto real do detector em funcionamento [14].

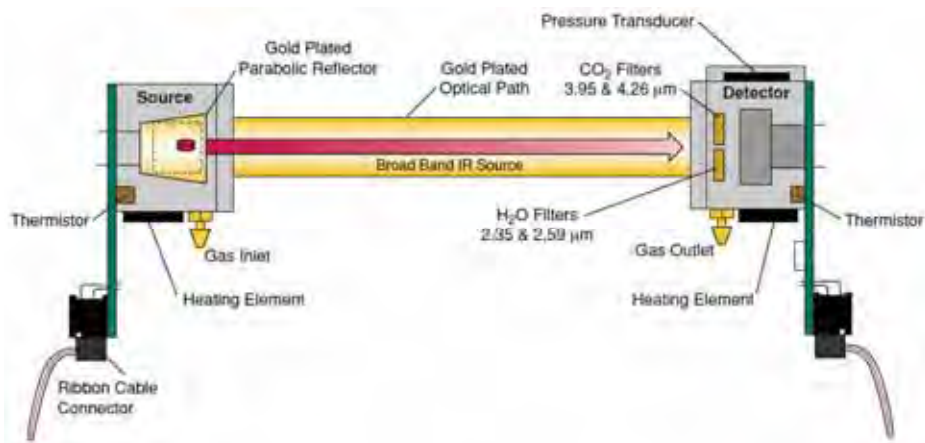


Figura 13b: Aspecto real do detector em funcionamento [14].

O sinal ativo para o CO_2 utiliza um filtro centrado em um comprimento de onda de $4,26 \mu\text{m}$ ($\lambda^{-1} \approx 2347 \text{ cm}^{-1}$), correspondente a sua banda de absorção do CO_2 , e o sinal de referência utiliza um filtro centrado em $3,95 \mu\text{m}$ ($\lambda^{-1} \approx 2532 \text{ cm}^{-1}$), não absorvido pelo CO_2 . Já para a H_2O o sinal ativo utiliza um filtro centrado em um comprimento de onda de $2,59 \mu\text{m}$ ($\lambda^{-1} \approx 3861 \text{ cm}^{-1}$), correspondente a sua banda de absorção e o sinal de referência utiliza um filtro centrado em $2,35 \mu\text{m}$ ($\lambda^{-1} \approx 4255 \text{ cm}^{-1}$), fora da banda de absorção do H_2O . Dessa forma, o detector ativo é usado para monitorar a radiação infravermelha absorvida pelo tanto pelo CO_2 quanto pela H_2O [14].



Figura 14: Foto dos dois fotodetectores duplos para CO_2 e H_2O .

3.7.4 Limpeza e calibração

Antes do uso do LI-840 para a coleta de dados, foi realizado o procedimento de limpeza e calibração do analisador. Tanto a limpeza quanto a calibração são dois procedimentos simples de serem realizados, mas de extrema importância para a obtenção de dados confiáveis. Apesar de ser simples, esse dois procedimentos devem ser realizados com atenção e cuidados, seguindo rigorosamente as orientações do fabricante.

Enquanto não estiver em uso, a entrada e saída de ar do analisador devem ser mantidas fechadas para que o interior do instrumento não seja contaminado por poeira e umidade, o que poderia em casos extremos, vir a danificar permanentemente o caminho óptico comprometendo assim o analisador.

Durante o uso do equipamento, um filtro de ar é necessário para minimizar ao máximo a contaminação do sistema por qualquer tipo de partícula. Mesmo assim, é comum com o passar do tempo ocorrer o acúmulo de poeira e umidade no caminho óptico do instrumento, momento em que se faz necessário à realização do procedimento de limpeza, para garantir a integridade do instrumento e das medidas realizadas.

Se o caminho óptico estiver muito sujo, isso irá comprometer a qualidade das medidas, por este motivo a Licor fornece um kit de limpeza juntamente com o LI-840 para que a limpeza possa ser executada pelo operador.

O kit, figura 16, é composto por dois tipos de cotonetes, um para limpeza do caminho óptico e outro para a limpeza do emissor e detector de infravermelho, por anéis de borracha para vedação e mangueiras de reposição interna. É orientação do fabricante é a substituição dos anéis de borracha, existentes entre a conexão do caminho óptico e detector e emissor de infravermelho. No momento da limpeza a substituição das mangueiras podem ser realizadas durante o procedimento de limpeza, caso seja necessário, em função da poeira que eventualmente tenha se depositado nelas.



Figura 15: Kit de limpeza que acompanha o analisador Licor LI-840. 1-Cotonete para limpeza da fonte de infravermelho e do detector, 2- Anéis de borracha de reposição, 3- Cotonetes para limpeza do caminho óptico, 4- mangueiras internas de reposição.

Para realização do procedimento de limpeza o LI-840 deve ser aberto e a bancada óptica retirada da caixa do instrumento, tal como mostrado na figura 18.

Uma vez retirada a bancada óptica, figura 17 (b), esta deve ser desmontada pela remoção dos parafusos laterais que fixam o detector e o emissor ao caminho óptico.

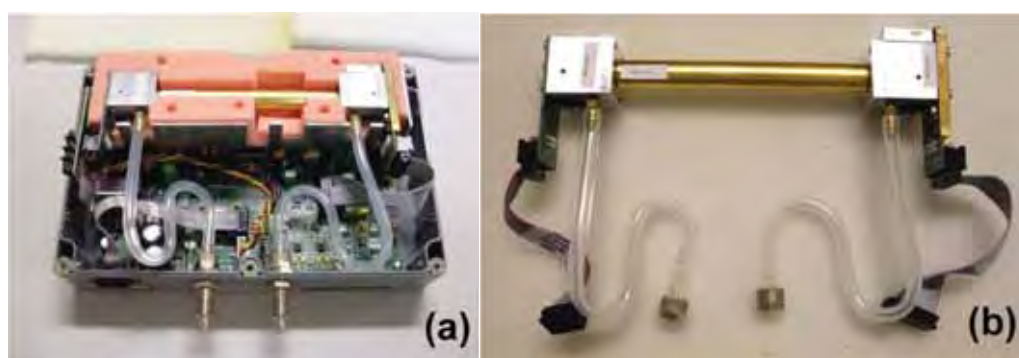


Figura 16: A esquerda tem-se o interior do analisador, e à direita bancada óptica completa.

Para limpeza do sistema deve ser preparada uma solução de etanol e água 50:50. Com muito cuidado, um cotonete embebido nesta solução é usado para limpar as extremidades do banco óptico e o interior do caminho óptico. Não deve ser usado em hipótese alguma qualquer produto abrasivo, pois este irá danificar irremediavelmente o revestimento de ouro do banco óptico [14]. Após a limpeza, é preciso que todas as partes estejam secas para que o analisador seja montado. A bancada óptica deve ser remontada iniciando-se pela conexão do detector e da fonte e, suas extremidades recolocadas no banco de espuma existente no interior da caixa do instrumento.

Em seguida, basta fechar cuidadosamente a caixa e o analisador está pronto para uso. É ideal que após o procedimento de limpeza o analisador seja recalibrado.



Figura 17: Foto retirada durante o procedimento de limpeza do LI-840.

3.7.5 Calibração

A calibração do analisador foi realizada no CENA – USP (Centro de Energia Nuclear na Agricultura). O procedimento de calibração do LI-840 é relativamente simples e requer duas amostras de gases, um ausente de CO₂ e outro com uma concentração conhecida de CO₂.

O software de aquisição de dados usado para registro dos dados coletados pelo LI-840 também é usado para calibração do analisador, onde a janela de calibração está representada na figura 19.

Por meio dele é possível calibrar o nível de Zero CO₂, onde a concentração de zero de CO₂ é registrada, e o de **Span CO₂**, onde é registrada uma concentração conhecida de CO₂. Ambas necessárias para a calibração do analisador.

Para calibrar a concentração de zero CO₂ é necessário usar um fluxo de gás seco e isento de CO₂, através do LI-840. Para isso foi usado um cilindro de nitrogênio, e em seguida o botão de Zero CO₂ deve ser acionado.

Para a calibração da concentração conhecida, faz-se circular pelo instrumento um gás com a correta concentração de CO₂ conhecida, e em seguida o botão **Span CO₂** é acionado, e a concentração de CO₂ usada deve ser informada no campo **Span gás concentration**. Foi usado um cilindro de CO₂ de 350 ppm de concentração, pois é indicado que seja usada uma concentração próxima a concentração que se deseja medir. Depois de realizado este procedimento o analisador está pronto para o uso.

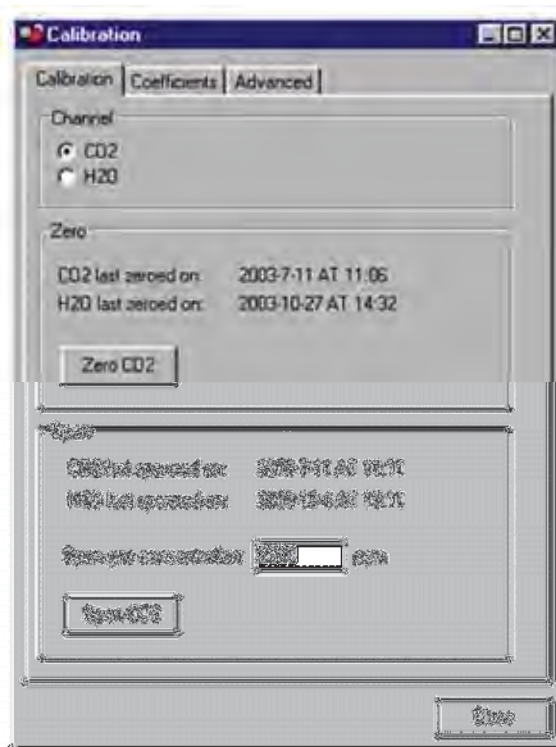


Figura 18: Tela de calibração do software do LI-840.

4 INSTRUMENTAÇÃO PARA COLETA DE DADOS

4.1 Descrição geral do sistema

Para que se possa determinar o fluxo de CO₂ do solo para a atmosfera precisamos dos dados referentes à taxa de emissão desse gás.

Essa taxa é obtida pela análise do aumento da concentração do CO₂ emitido em função do tempo no interior da câmara dinâmica. Como o fluxo, ou respiração é fortemente influenciado por fatores ambientais externos, se faz necessário o registro da variação de alguns desses fatores para que se possam quantificar adequadamente os valores de fluxo de CO₂.

Dentre as muitas variáveis que podem influenciar a produção e emissão de CO₂ do solo, podemos destacar as propriedades físicas e químicas do solo, o tipo de vegetação, a quantidade de matéria orgânica presente no solo, a pressão atmosférica, a temperatura e umidade do ar e do solo. Dentre estas, podemos destacar como principais, a pressão atmosférica, a temperatura e a umidade do solo, pois já se sabe que estes fatores influenciam diretamente a produção de CO₂ e são comumente utilizados para a quantificação e análise dos fluxos de CO₂.

Na figura 20 temos uma visão geral do sistema, desde a aquisição das variáveis necessárias até a quantificação dos valores de emissão de CO₂.

Basicamente, podemos dividir as variáveis relevantes em três grupos principais, sendo elas:

Variáveis atmosféricas: Como variáveis atmosféricas a mais relevante é a pressão atmosférica, uma vez que esta entra diretamente nos cálculos do fluxo de CO₂, e influencia diretamente a liberação de carbono.

Variáveis como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento são fatores que podem ser muito úteis na análise da variação sazonal dos fluxos de CO₂. Estes dados foram obtidos através de um instrumento Termo Hígro da marca La Crosse Technology, modelo WS-2317EL.

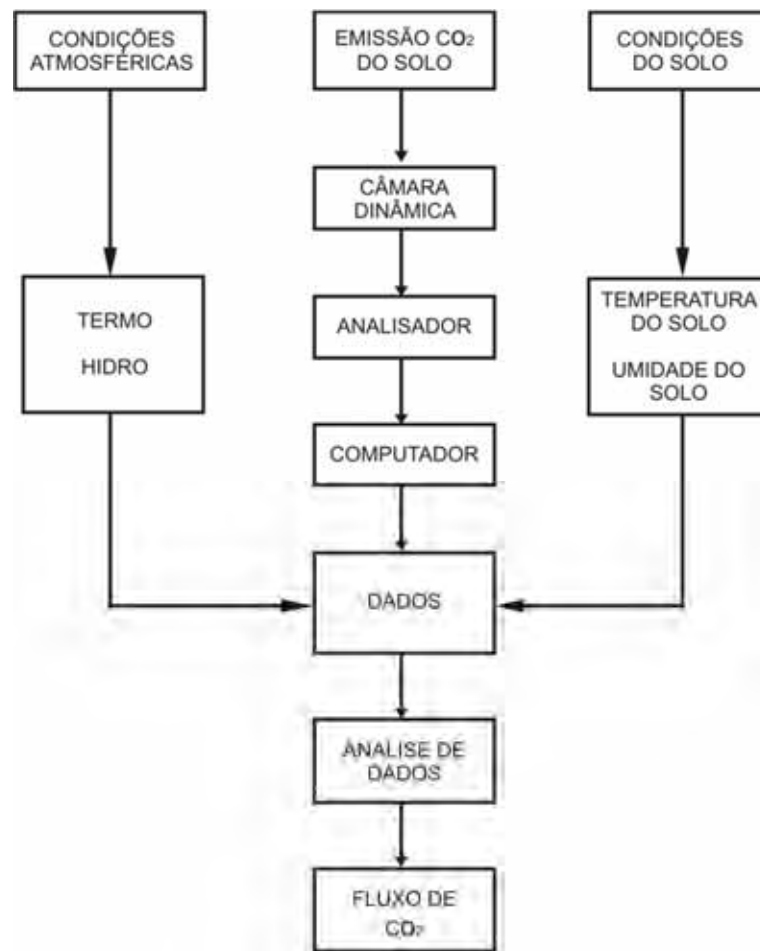


Figura 19: Fluxograma geral de funcionamento do sistema.

Variáveis do solo: As concentrações de umidade do solo não foram coletadas e levadas em consideração neste trabalho, mas estes poderiam se obtidos por meio de um equipamento com sensor do tipo refletômetro, como o HydroSense Soil System, modelo CS620.

A temperatura do solo foi obtida por meio de um termômetro digital do tipo espeto instalado na base da câmara de coleta e registrados em uma planilha, juntamente com os demais dados referentes às condições atmosféricas e posteriormente cruzados com os dados de emissão de CO₂.

Taxa de emissão de CO₂: As taxas de emissão do solo são determinadas pela concentração do CO₂ no interior da câmara dinâmica em função do tempo. A amostra de ar do interior da câmara é conduzida até o analisador por meio

mangueiras de conexão e uma bomba onde o teor de CO₂ determinado pelo analisador (IRGA). Os dados registrados pelo analisador são enviados a um computador por meio de uma porta de comunicação serial controlada pelo software que acompanha o instrumento.

4.2 Desenvolvimento do equipamento

Para que se possa utilizar o sistema de câmaras dinâmicas para a determinação das taxas de fluxo de CO₂ do solo por meio de IRGAS, se faz necessário que todos os recursos auxiliares necessário estejam presentes em campo, tais como fontes de alimentação do sistema, sistema de aquisição de dados, e no caso do uso de câmaras automáticas também deve estar presente o sistema de controle da mesma.

Com o objetivo de viabilizar o uso da IRGA (LI-840) em campo de maneira prática e eficiente, todo o sistema foi projetado e acomodado em duas maletas onde todos os elementos necessários para o uso e coleta de dos dados referentes aos fluxos de CO₂ pudessem ser feitos.

Não apenas a praticidade de uso foi levada em consideração, mas também a flexibilidade e o baixo custo da montagem, feita a partir de materiais de fácil obtenção no comércio local. A flexibilidade do equipamento se caracteriza pelo fato de sua montagem estar distribuída em duas maletas independentes, uma contendo o analisador de gases IRGA, bem como os recursos necessários para o seu uso, e a outra composta por um computador alimentado por um sistema de 12V, responsável pelo armazenamento dos dados coletados pelo analisador e pelo controle automático da câmara. Optou-se pelo uso de um computador montado em uma maleta e não simplesmente um notebook devido ao fato de um sistema de coleta de dados montado em uma maleta se mostrar uma opção mais barata e mais robusta. Desta forma o sistema pode ser deixado em campo por longos períodos, de acordo com a capacidade alimentação das baterias usadas ou da disposição de fontes de energia no local, até mesmo sem a necessidade da presença de um operador em tempo integral durante o período de coleta.

No caso do uso do analisador em laboratório, a maleta de coleta de dados por ser dispensada e substituída por um computador tradicional. No caso do uso em campo, existem duas opções de uso do sistema, a primeira utilizando-se o sistema completo

com a maleta do analisador em conjunto com a maleta de controle e aquisição de dados, mais adequada para coletas durante longos períodos, ou apenas a maleta do analisador e um notebook, mais adequando para coletas rápidas e que não exijam um grande número de pontos de amostragem.

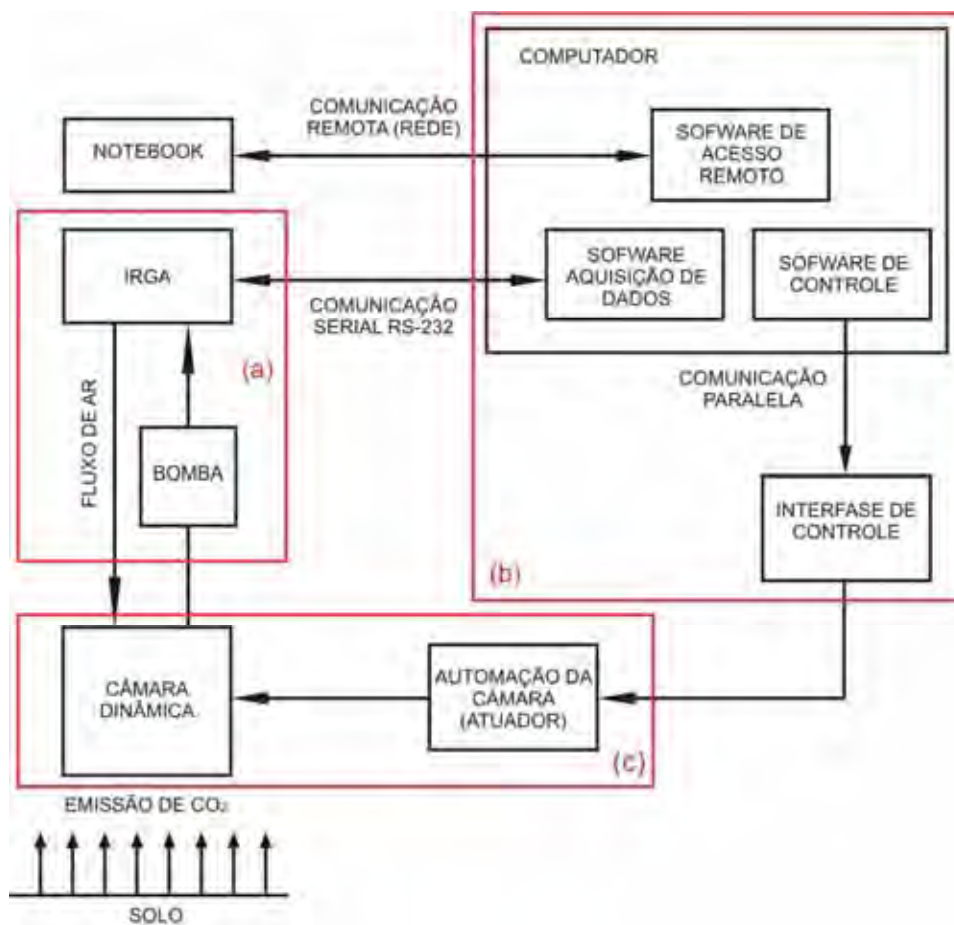


Figura 20: Fluxograma de funcionamento e operação do sistema. a) Maleta do analisador, b) Maleta de controle e armazenamento, c) Câmara automática.

Na figura 21 está representado o fluxograma de funcionamento completo do sistema, com a câmara de coleta, figura 21 (c), maleta do analisador, figura 21 (a), e a maleta de controle a armazenamento de dados, figura 21 (b).

Por se tratar de um computador completo, a maleta de aquisição de dados pode ser usada independentemente do analisador, em conjunto com outros instrumentos, tanto em laboratório quanto em campo, e que necessitem de um computador para controle ou coleta de dados.

Outro aspecto importante está no fato de que com o uso da maleta de aquisição de dados, existe a possibilidade de acompanhamento remoto tanto da coleta dados quanto do controle do sistema, caso exista no local a disponibilidade de uma rede sem fio ou internet WI-FI.

4.2.1 Sistema de coleta de dados

Para a maleta de coleta, o sistema completo é composto basicamente pelo analisador LI-840 de CO₂ e H₂O da Licor, fontes de alimentação do 12V (para uso na rede em 127V AC), bomba para a condução para dentro do analisador, os filtros de ar e o rotâmetro para acompanhamento do fluxo de ar do sistema. Um diagrama do fluxo gás pelo sistema pode ser observado na figura 24.

Na figura 22 temos um esquema da montagem do dispositivo da maleta:



Figura 21: Montagem do LI-840 na maleta do analisador.

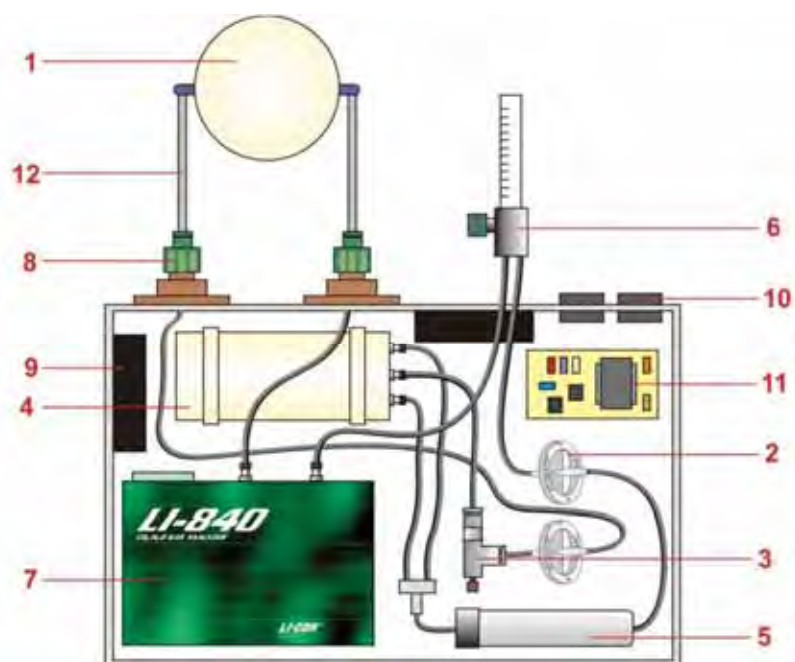


Figura 22: Vista interior da maleta do analisador e suas partes constituintes.

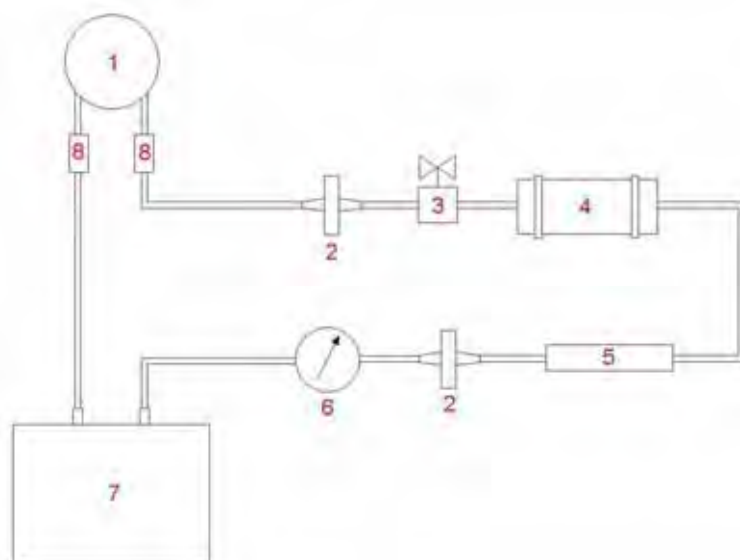


Figura 23: Diagrama do fluxo de gás pelo sistema. 1- Câmara Dinâmica, 2- Filtro de ar, 3 – Registro para controle de fluxo, 4 – Bomba, 5 – Trap de sílica, 6 – Rotâmetro, 8 - Engate

Na figura 23 podem-se identificar os seguintes constituintes da maleta do analisador.

1) Câmara dinâmica: Responsável pelo armazenamento da emissão de CO₂ proveniente do solo.

2) Filtro: Filtro Gelman de 1 micron, construído com carcaça de polipropileno e membrana de teflon, necessário para a filtragem do ar, colocado na entrada da corrente de ar antes de entrar no analisador, e após ao trap de sílica, para impedir à contaminação da via óptica por qualquer tipo de partícula.

3) Válvula: Válvula tipo parafuso responsável pela regulagem fina do fluxo de ar da bomba para o analisador.

4) Bomba: responsável pela captação e condução do ar até o analisador

5) Trap: Trap de sílica para redução da umidade presente no ar.

6) Rotâmetro: Necessário para o controle do fluxo de ar pelo analisador dentro da faixa indicada pelo fabricante do LI-840 que é de um litro por minuto.

7) Analisador LI-840: Analisador LI-840 (LICOR) de caminho fechado, responsável pela análise e determinação do teor de CO₂ e H₂O do gás analisado.

8) Engate: Engate rápido, usado para a conexão por meio de mangueiras, para conexão da câmara dinâmica à maleta do analisador.

9) Ventoinhas (cooler): Responsáveis pela ventilação interna da maleta com o objetivo de evitar o aquecimento excessivo.

10) Painel traseiro: Painel com as conexões de alimentação de energia e de comunicação de dados.

11) Fonte de alimentação interna: conversor 127V AC para 12V DC

12) Mangueiras: Necessárias para a conexão e transporte da concentração de CO₂ da câmara dinâmica para a maleta do analisador.

13) Multímetro: Para acompanhamento do nível de tensão das baterias.

14) Termo Hígro: Instrumento necessário para fornecimento de dados tais como pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, necessários ao cálculo dos fluxos de CO₂ do solo.

4.2.1.1 Painel superior da maleta do analisador

O painel superior está montado sobre a tampa da maleta do analisador, figura 25, e nela estão afixados o sensor Termo Hígro responsável pela coleta de dados atmosféricos, um multímetro e o rotâmetro. O uso do multímetro se faz necessário para o acompanhamento do nível de tensão da bateria, quando em uso em campo, e também para a verificação da tensão de entrada, no caso do uso de alguma outra fonte externa, tal como da bateria de um carro por meio do acendedor de cigarros.

No painel superior também se encontra o rotâmetro, necessário para o acompanhamento do fluxo de gás injetado no interior do analisador, e que deve estar dentro da faixa de um litro por minuto, tal como especificado pelo fabricante do analisador.

O rotâmetro usado é comercial usado em hospitais, para rede canalizada de ar comprimido e em cilindros de ar e oxigênio, construído com corpo em metal, com escala de 0 a 15 LPM, contanto com um registro, que permite o ajuste do fluxo de ar na vazão desejada.



Figura 24: Vista do painel superior da maleta do analisador, constando da esquerda para direita de sensor Termo Hígro, multímetro e rotâmetro.

4.2.1.2 Painel inferior da maleta do analisador

O painel inferior está montado sobre a tampa da parte inferior da maleta do analisador, figura 26, sob a qual estão os principais elementos da maleta, assim como toda a parte elétrica do sistema, que está representada na figura 28. Neste painel constam os botões de acionamento da bomba e do analisador bem como os controles da fonte de alimentação. Na figura 26 temos a vista superior do painel frontal seguida de um descritivo de suas partes constituintes na figura 27.



Figura 25: Painel inferior da maleta do analisador

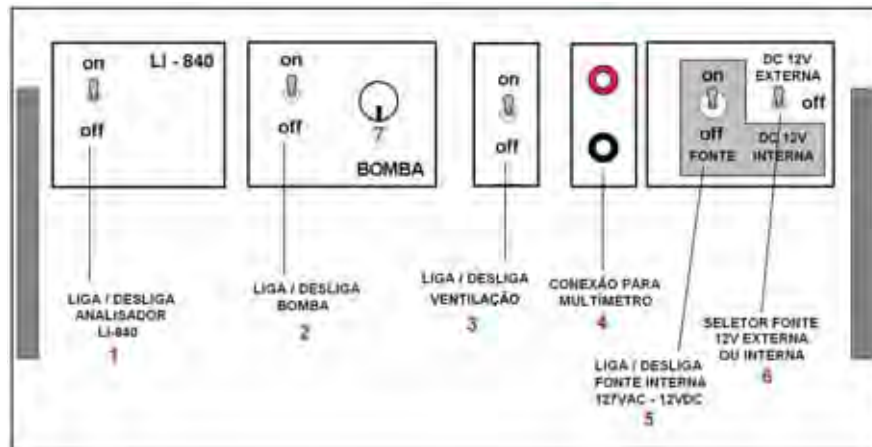


Figura 26: Vista superior do painel da maleta

1) Liga / Desliga analisador: Chave para ligar e desligar o analisador LI-840, que só deverá ser ligado após a bomba estar em operação.

2) Liga / Desliga bomba: Chave para ligar e desligar a bomba responsável pela condução do ar a ser analisado até o interior do analisador. A bomba deve ser acionada antes de ligar o LI-840.

3) Liga / Desliga ventilação: Chave responsável pelo acionamento da ventilação interna da maleta com o objetivo de evitar o aquecimento excessivo.

4) Conexão para multímetro: usada quando se deseja conferir a tensão de alimentação do analisador, principalmente quando se utilizar fontes externas de alimentação tais como baterias, alimentação via acendedor de cigarros do carro, etc.

5) Liga / Desliga fonte interna: Permite ligar e desligar a fonte de alimentação interna, somente estará habilitado quando a chave seletora de fonte estiver na opção *12V DC interna*.

6) Seletor de fonte interna ou externa: Permite selecionar o tipo de alimentação, interna de 12V a partir da fonte de alimentação 127V AC – 12V DC ou alimentação externa 12V DC, proveniente de bateria, etc.

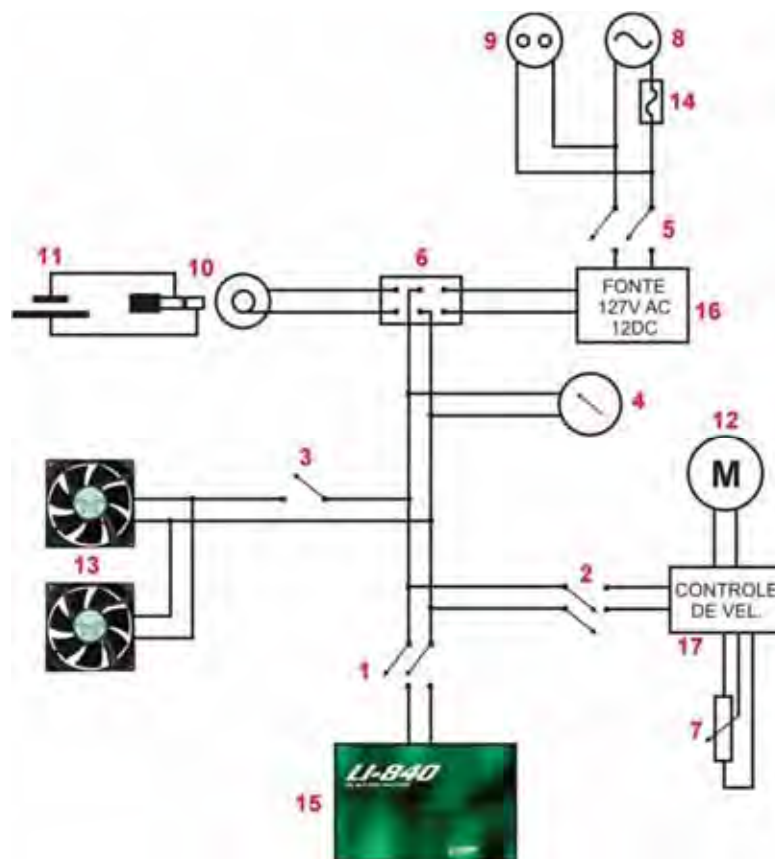


Figura 27: Circuito elétrico da maleta

7) Potenciômetro: Potenciômetro do controle de velocidade do motor da bomba.

8) Tensão alternada: Conexão para entrada de tensão alternada de 127V para alimentação da fonte interna.

9) Saída de tensão alternada: Conexão de saída de tensão alternada para alimentação de outros equipamentos.

10) Conector de tensão contínua: Conector para a alimentação do sistema com tensão de 12V de corrente contínua externa.

11) Bateria: Bateria externa localizada na maleta de coleta de dados ou proveniente de qualquer outra fonte externa tal como painel solar, etc.

12) Motor: Motor da bomba

13) Cooler: Cooler responsável pela refrigeração do sistema.

14) Fusível: Fusível de proteção do sistema em caso de sobrecarga ou curto no sistema.

15) Analisador: Analisador LI-840 Licor.

16) Fonte: Fonte de alimentação para alimentação do circuito à partir da rede, com entrada de 127V DC e saída de 12V AC.

17) Controle de velocidade: Circuito do controle de velocidade do motor da bomba, permite regular a fluxo de ar por meio da tensão de entrada da bomba.

4.2.1.3 Painel traseiro

Na figura 29 pode-se observar o painel da parte traseira da maleta do analisador. Nele se localizam as conexões para alimentação do sistema, comunicação e entrada e saída da amostra de gás analisado. Abaixo temos a vista traseira da maleta de coleta bem como dos elementos que compõe este painel. Em seguida temos um descritivo de suas partes constituintes.

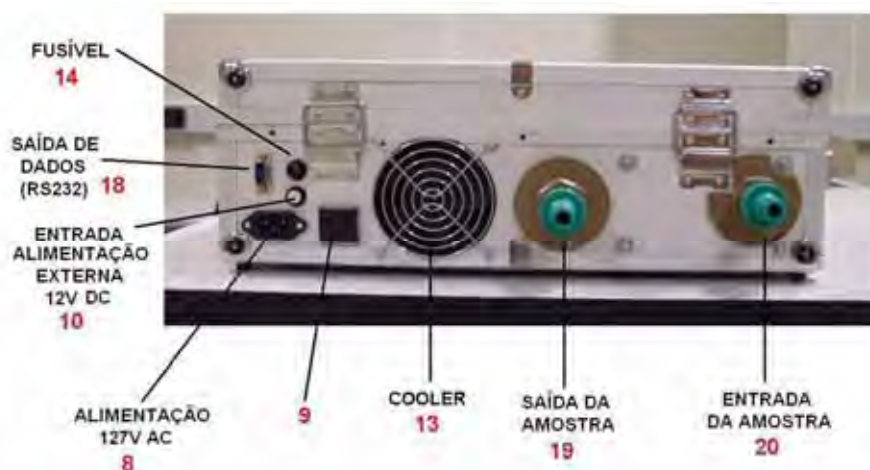


Figura 28: Vista traseira da maleta

8) Alimentação 127 V AC: Conexão para alimentação externa 127V AC, padrão IBM PC.

9) Saída 127V AC: Saída de 127V AC auxiliar, para o uso em qualquer outro equipamento.

10) Entrada de alimentação externa 12V: Conexão para alimentação externa de 12V DC, para permitir a conexão com a bateria externa responsável pela alimentação do sistema quando em uso em campo. Pode também ser usada para alimentação por qualquer outra fonte de 12V, tais como de adaptadores para acendedores de cigarro automotivo, fontes externas de alimentação, painéis solares, etc.

13) Cooler: Responsável pela ventilação interna da maleta, necessária para impedir que a temperatura no interior da maleta se eleve acima dos níveis adequados de operação do analisador.

14) Fusível: Fusível de proteção 127V, 2A.

18) Saída de dados: Conector DB-9 para a conexão de dados entre o analisador e o computador .

19) Saída da amostra: Após passar pelo analisador, a amostra de gás analisado deve ser reconduzida até o interior da câmara dinâmica, o que é feito por meio desta saída.

20) Entrada da amostra: Entrada de ar para a análise está diretamente ligado à bomba de sucção interna, e é responsável pela circulação da amostra de ar entre interior da câmara dinâmica e o interior do analisador.

4.2.2 Procedimento de operação e uso

Para o uso da maleta do analisador, inicialmente deve-se verificar se todas as chaves estão na posição OFF antes de ligar a alimentação, seja ela de 12 V DC externa ou da rede 127 V AC.

A seleção da fonte de alimentação é realizada pela chave 6, que poderá ser uma fonte de 12 V DC ou por meio da rede elétrica de 127 V AC quando em uso em laboratório. A fonte de 12 V poderá ser uma bateria, painel solar ou outra fonte qualquer de 12 V de corrente contínua. No caso da alimentação por meio da rede elétrica de 127 V AC, após seccionar-se esta opção, a chave 5 deve ser colocada na posição ON, ligando assim a fonte a alimentação interna no sistema que fornecerá 12 V DC a partir da tensão 127 V da rede.

Feito isto, deverá aparecer o valor da tensão no display digital do multímetro, que deverá estar na posição de voltímetro DC em uma escala correspondente não inferior a 12 V. Estando a tensão no valor adequado ao uso do equipamento (em torno de 12 V) poderá se prosseguir as etapas seguintes.

O próximo passo será ligar a bomba de sucção de ar para que este comece a circular pelo sistema, que está representado na figura 24. Isto é importante que seja feito antes de se ligar o analisador LI-840.

Por meio do potenciômetro de controle de velocidade do motor da bomba pode-se ajustar o fluxo de ar em 1l/min, juntamente com a válvula do rotâmetro, por meio do qual o valor do fluxo de ar poderá ser conferido.

Uma vez ajustado o fluxo de ar em 1l/min, pode-se colocar a chave 1 na posição ON, ligando-se assim o analisador LI-840, que após cerca de 20 minutos está pronto para operação. Este tempo é necessário para que a temperatura interna do sensor do analisador atinja o valor adequado de operação em torno de 51.9 °C.

4.3 Sistema de controle e armazenamento de dados

A maleta de controle e armazenamento de dados é responsável pelo controle da automação da câmara dinâmica e pelo armazenamento dos dados coletados pelo analisador, figura 30. Nesta maleta também se encontram as baterias responsáveis

pela alimentação do sistema. Internamente a maleta possui um computador do tipo MINI-ITX de baixo consumo, cerca de um disco rígido (HD), e uma interfase de comunicação da porta paralela, para o controle da câmara automática. Na figura 31 temos a relação dessas partes constituintes, e na figura 32 temos o diagrama do circuito elétrico da maleta de maleta de controle e armazenamento.



Figura 29: Maleta de controle e armazenamento



Figura 30: Vista interna da maleta de controle e armazenamento

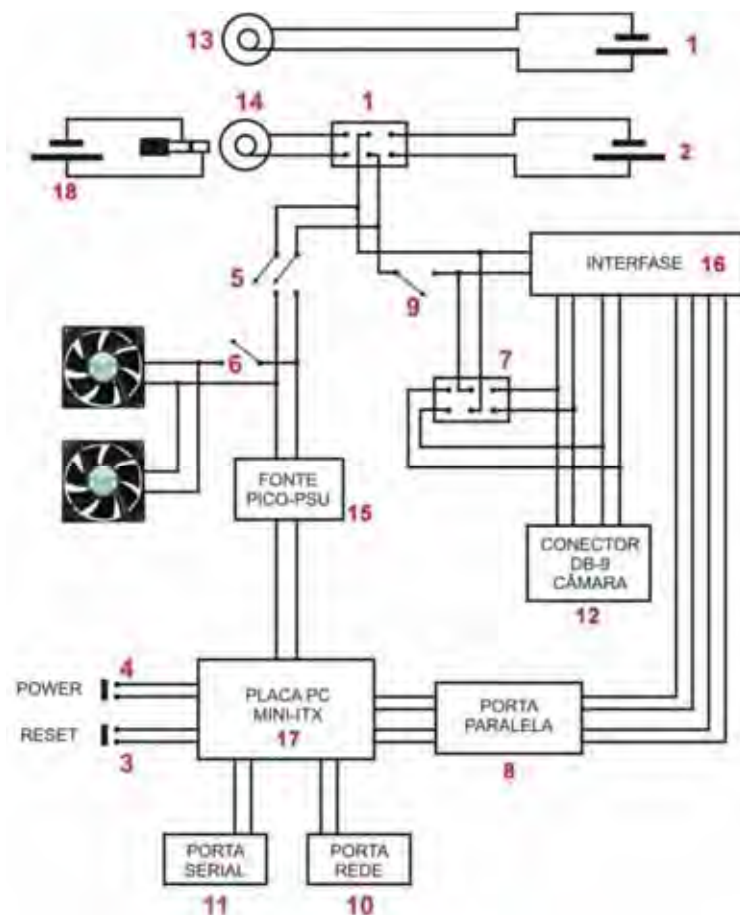


Figura 31: Circuito elétrico da maleta de controle e armazenamento.

1 e 2) Baterias: Baterias de 12V, usadas na alimentação da maleta do analisador e para alimentação da maleta de controle.

Na figura 33 temos o painel frontal externo da maleta de controle e armazenamento, cujos respectivos botões de comando estão descritos dos itens de 3 a 9.

3) Reset: Botão de reset do computador, situado no painel frontal da maleta.

4) Power: Botão Power do computador, situado no painel frontal da maleta.

5) Liga PC: Libera a alimentação necessária para o funcionamento do computador.

6) Cooler: Chave responsável pelo acionamento da ventilação do sistema, que só funcionará após ser ligada a chave 5 que libera a alimentação para o funcionamento do computador.

7) Controle manual da câmara: Por meio desta chave é possível controlar a subida e descida da câmara automática manualmente, sem a necessidade do comando do computador.

8) Seleciona fonte: Permite selecionar a fonte de alimentação. Bateria interna de 12V ou alimentação externa 12V DC, proveniente de outra bateria, painel solar, etc.

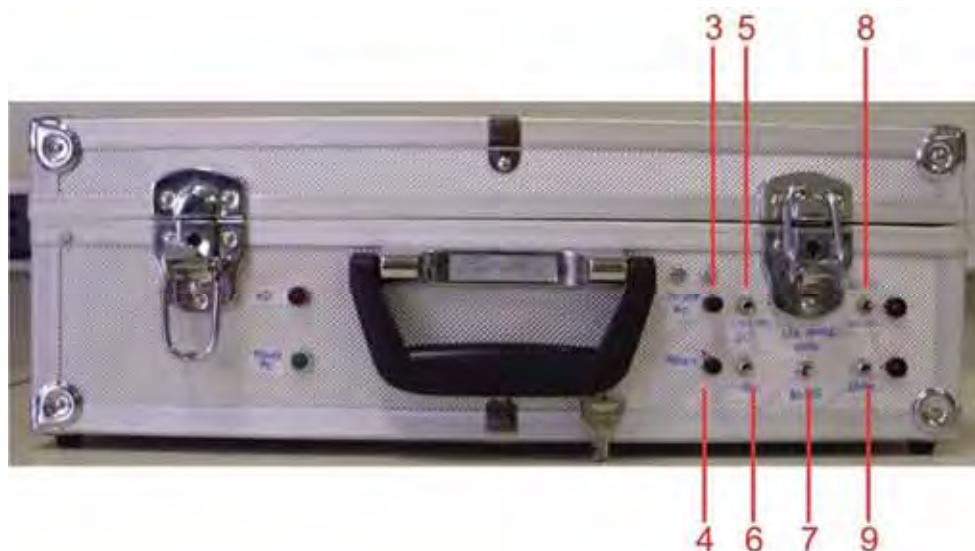


Figura 32: Painel frontal da maleta de controle e armazenamento.

9) Câmara automática: Liga e desliga a câmara automática, que permite interferir no sistema caso ocorra algum problema durante a coleta em campo.

Na figura 34 temos o painel traseiro externo da maleta de controle e armazenamento, cujos elementos estão descritos dos itens de 10 a 14.

10) Porta de Rede: Conector de rede RJ-45 localizado no painel traseiro da maleta, usada para conexão remota com outro computador.

11) Porta serial: Usada para a comunicação serial do computador com o analisador LI-840.

12) Conector DB-9: Conector DB-9, existente na parte traseira da maleta, necessária conexão da câmara com a maleta de controle.

13) Saída de 12V: Conector de saída de 12V DC, necessária para alimentação da maleta do analisador.

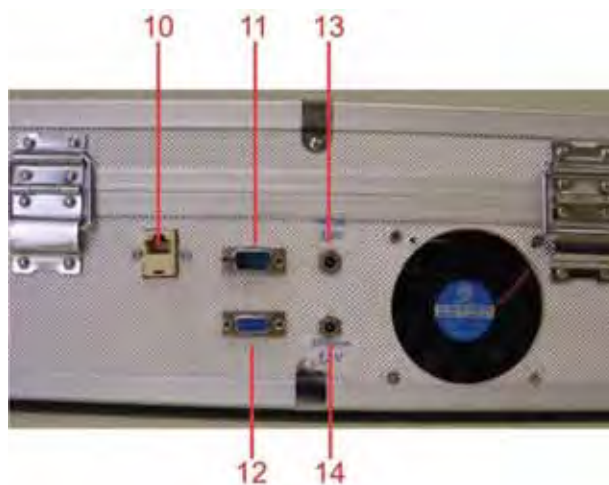


Figura 33: Painel traseiro da maleta de coleta

14) Entrada de 12V: Conector de entrada de 12V DC, para alimentação da maleta de controle por meio de uma fonte externa.

15) Fonte PICO-PSU: Fonte de alimentação da placa-mãe responsável pela conversão da tensão de 12V da bateria para o padrão de alimentação ATX da placa-mãe.

16) Interfase de controle: Circuito de interfase para controle da câmara automática por meio da porta paralela do computador.

17) Placa Mini-ITX: Placa-mãe de computador Mini-ITX ATOM Intel Desktop Board, modelo D525MW de 1,8GHz, de baixo consumo.

18) Bateria externa: Bateria ou fonte externa de 12V DC.

19) Disco Rígido (HD): Disco rígido (HD) onde se encontra instalado o sistema operacional e os demais programas necessários.

20) Porta paralela: Porta paralela do computador usada para o controle da câmara automática por meio da interface.

4.4 Câmaras de coleta de fluxo de CO₂ do solo

4.4.1 Câmara dinâmica

Para determinação do fluxo de CO₂ do solo, além da maleta será necessária também uma câmara para coleta das amostras de CO₂ do solo. A câmara é feita de PVC de formato cilíndrico, podendo seu volume variar. Em geral utilizam-se tamanhos em torno de 10 a 20 cm de diâmetros e 20 cm de altura. A câmara utilizada terá 21 cm de altura por 14,30 cm de diâmetro, sendo seu volume interno de 3372,7 cm³, ou aproximadamente 0,0034 m³.

Para o cálculo do fluxo de CO₂ é necessário conhecer o volume interno da câmara, por este motivo ao ser instalada no solo a altura da câmara em relação ao solo deve ser determinada. Um desenho esquemático da câmara manual está representado na figura 35:

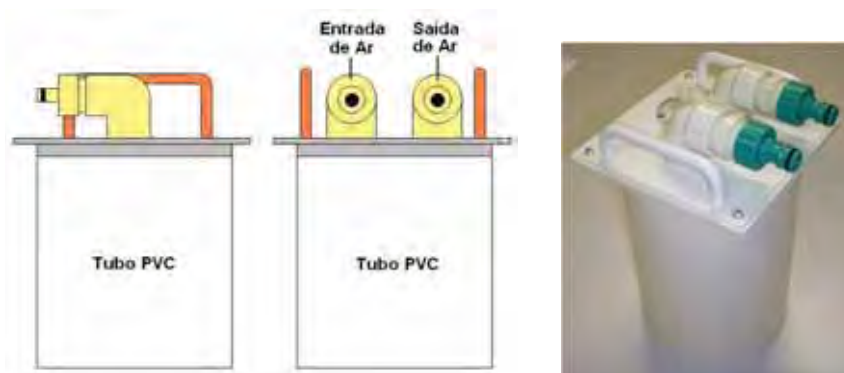


Figura 34: Câmara de coleta manual.

4.4.2 Câmara automática

A câmara automática é similar a câmara manual e possui o mesmo princípio de funcionamento quanto à coleta de CO₂. A diferença principal está no fato de que na câmara automática, a câmara dinâmica está montada sobre um suporte automatizado que permite que a câmara seja aberta de forma automatizada, sem a necessidade de um operador. Na figura 36 temos a câmara automática em uso.



Figura 35: Câmara automática em uso. (a) completamente aberta e (b) completamente fechada.

A abertura e fechamento da câmara pode ser feita pelo operador, manualmente, ou pelo computador responsável pelo controle e armazenamento de dados. A movimentação da câmara se dá pela atuação de uma caixa de redução na base do sistema, figura 37b, ligado a um conjunto de polias responsáveis pela movimentação da câmara propriamente dita.

O sistema automatizado conta também com dois fins de curso, figura 37a, responsáveis pela interrupção do movimento quando a câmara atinge o seu nível de abertura e fechamento adequados.

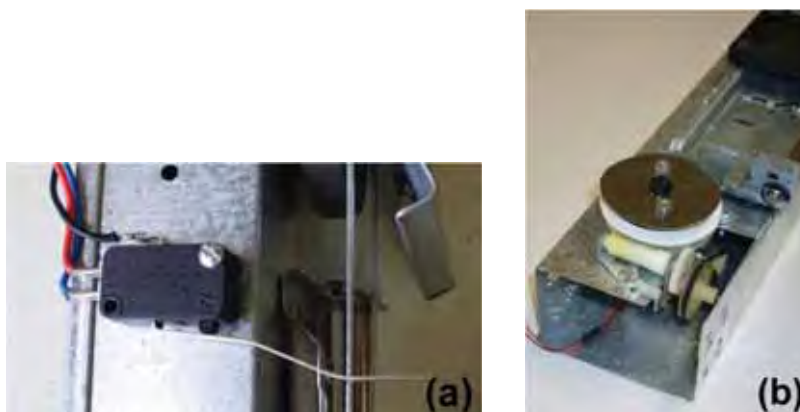


Figura 36: (a) Relê de fim de curso e (b) caixa de redução

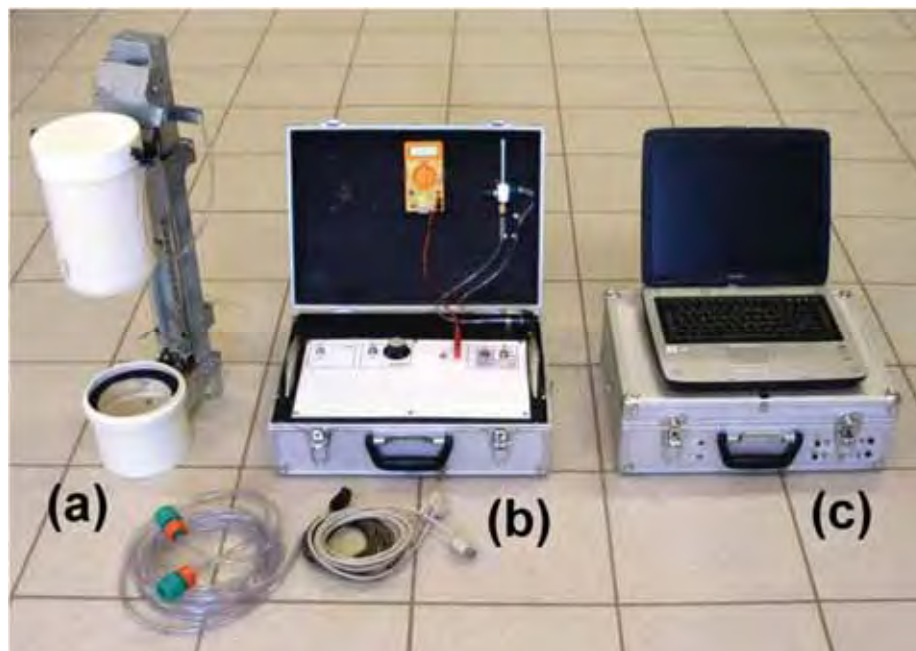


Figura 37: Montagem completa do sistema. (a) câmara automática, (b) maleta de coleta de dados e (c) maleta de controle e armazenamento.

5 RESULTADOS INICIAIS E DISCUSSÃO

Diversos trabalhos referentes respiração do solo tem demonstrado a variação de respiração do solo associado ao tipo de vegetação superficial e a variação de variáveis climáticas, principalmente quanto à temperatura e a umidade do solo.

Os dados apresentados abaixo foram coletados dentro da UNESP, campus de Rio Claro inicialmente coletados para avaliação de funcionamento da instrumentação.

A figura 39 representa uma série de coleta com o fechamento da câmara em cinco momentos distintos, cada fechamento é representado por um pico de crescimento dos níveis de CO_2 dentro câmara, até a sua abertura, momento em que os níveis de CO_2 caem rapidamente. Os pontos referentes a cada curva foram isolados e tratados posteriormente, por regressão linear obtemos a taxa de variação de CO_2 emitido pelo solo a retido dentro da câmara, durante o período em que está fechada, e assim é possível se determinar o fluxo de CO_2 emitido pelo solo.

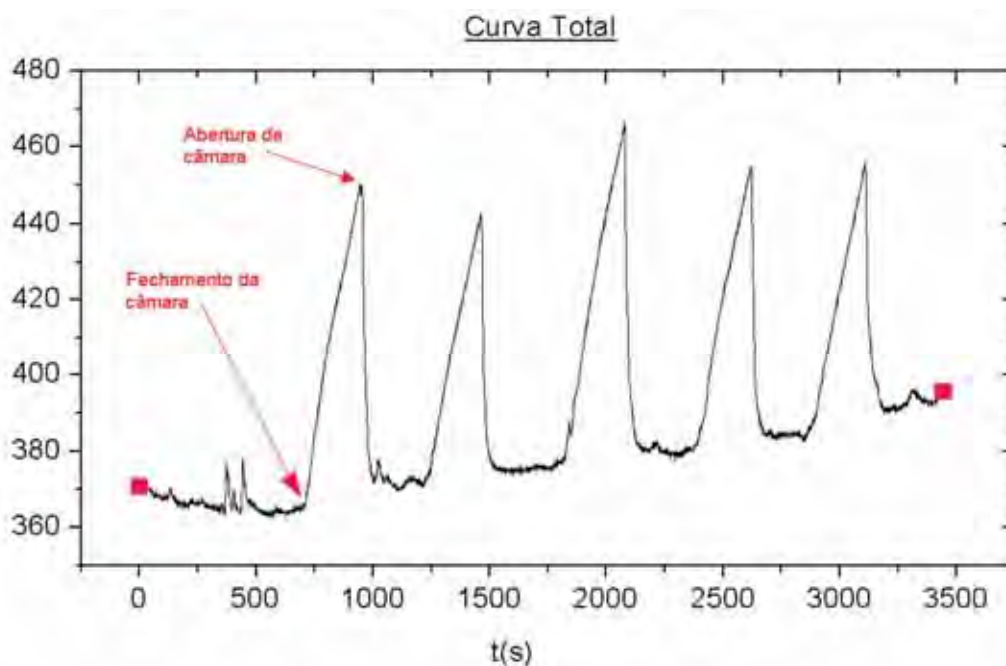


Figura 38: Concentração de CO_2 em função do tempo para uma sequência de cinco coletas.

Durante a análise dos dados, observou-se a saturação da câmara em todas as cinco curvas correspondentes a cada uma das coletas, sendo que após um tempo de aproximadamente 2 minutos a taxa de emissão de CO_2 apresentou uma sensível queda. Este fato se deve ao aumento da pressão no interior da câmara que acaba por entrar em equilíbrio com a pressão do ar no interior do solo, reduzindo assim o fluxo emitido. Na figura 40 podemos observar o ponto de inflexão que representa a mudança na taxa de emissão de CO_2 .

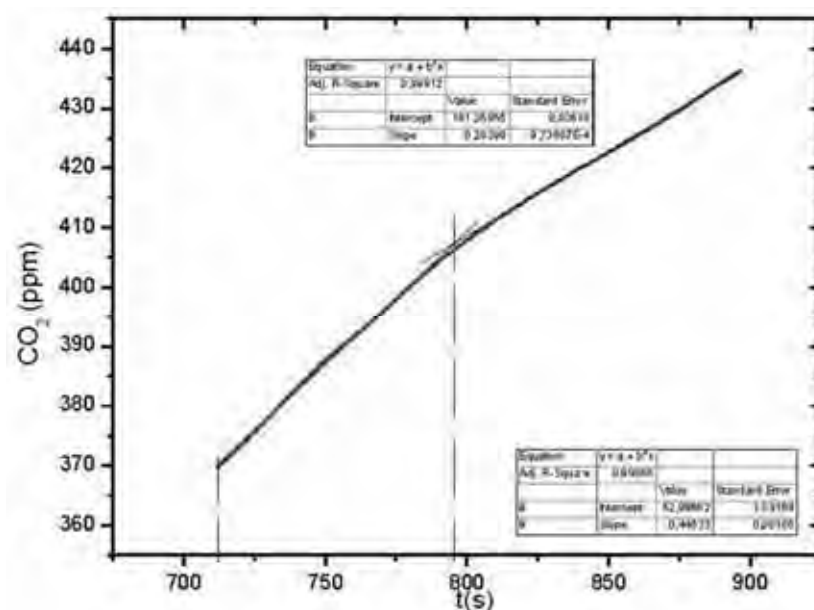


Figura 39: Ponto de saturação a partir do qual há uma redução da taxa de emissão de CO₂ do solo.

Por este motivo, para efeito de cálculo dos fluxos de CO₂, foram levados em consideração apenas os pontos referentes aos dois minutos iniciais, anteriores ao momento de saturação da câmara.

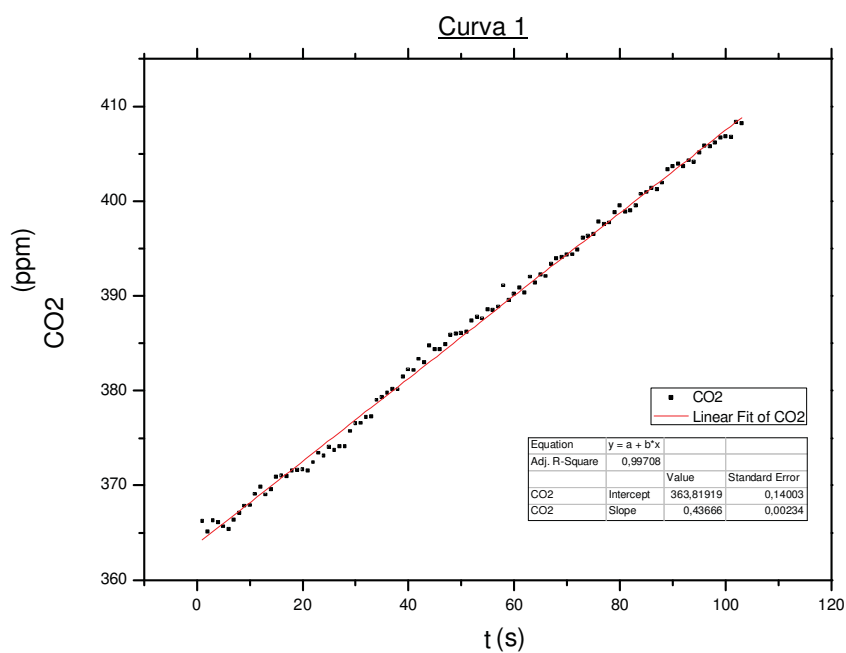


Figura 40a: Análise da primeira curva de coleta.

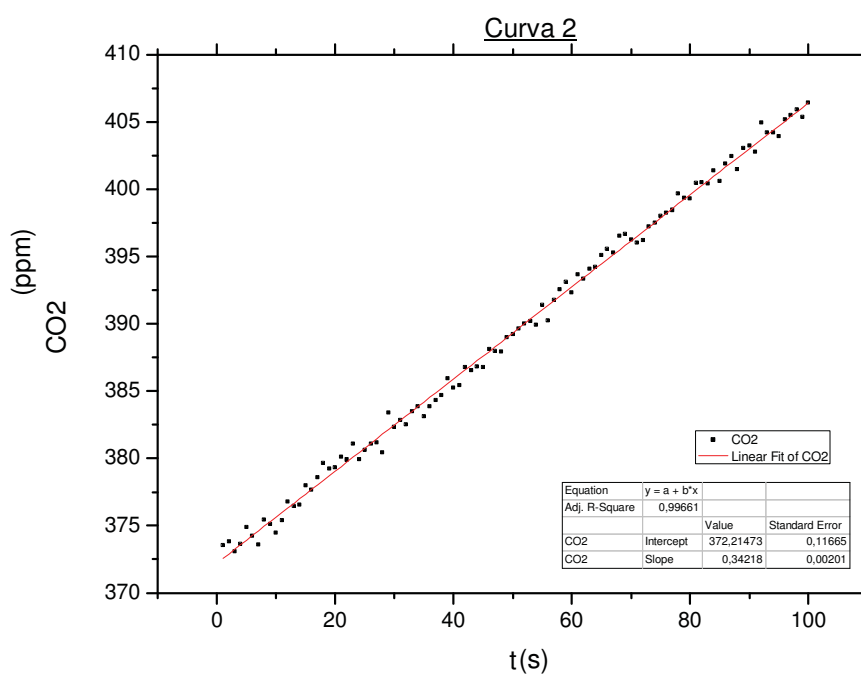


Figura 40b: Análise da segunda curva de coleta.

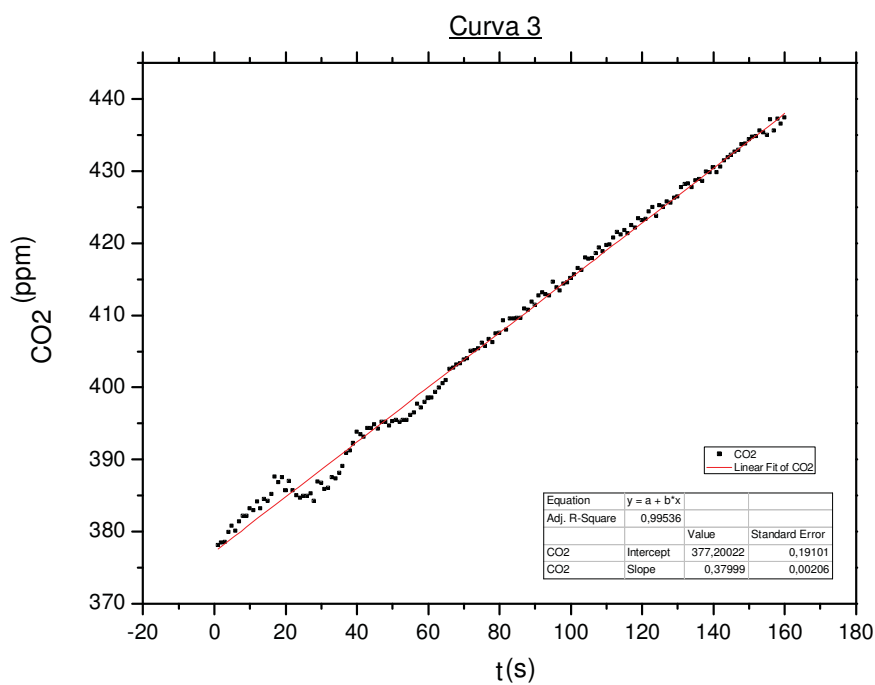


Figura 40c: Análise da terceira curva de coleta.

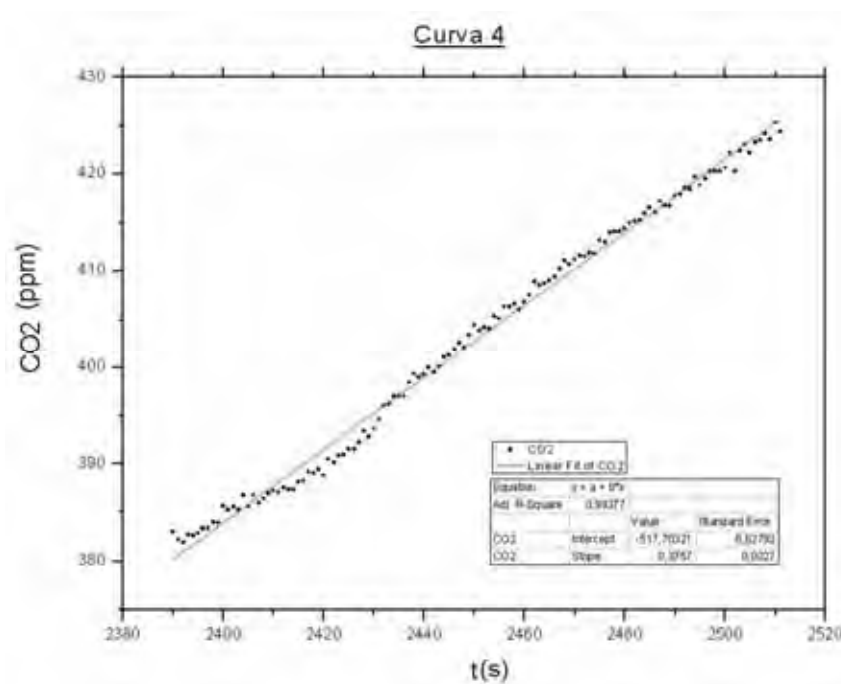


Figura 40d: Análise das quarta curva de coleta.

Os valores obtidos para os fluxos de CO₂ do solo, a partir dos dados acima estão relacionados na tabela 2.

Tabela 2: Fluxos obtidos para as cinco curvas analisadas.

Fluxos de CO₂ (μ mol m⁻² s⁻¹)	
Curva 1	3,5
Curva 2	2,63
Curva 3	2,91
Curva 4	2,88
Curva 5	2,44

Posteriormente uma nova coleta foi realizada em uma sequência de 23 pontos, entre as 10:30h até as 15:30h aproximadamente, onde de e os seguintes dados foram obtidos estão representados na figura 42:

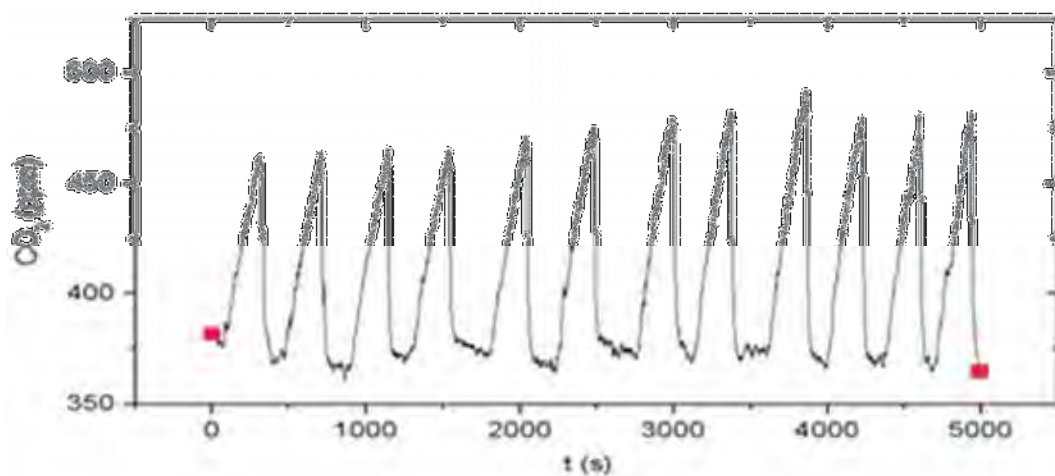


Figura 41: Concentrações de CO_2 para os 12 primeiros fechamentos da câmara.

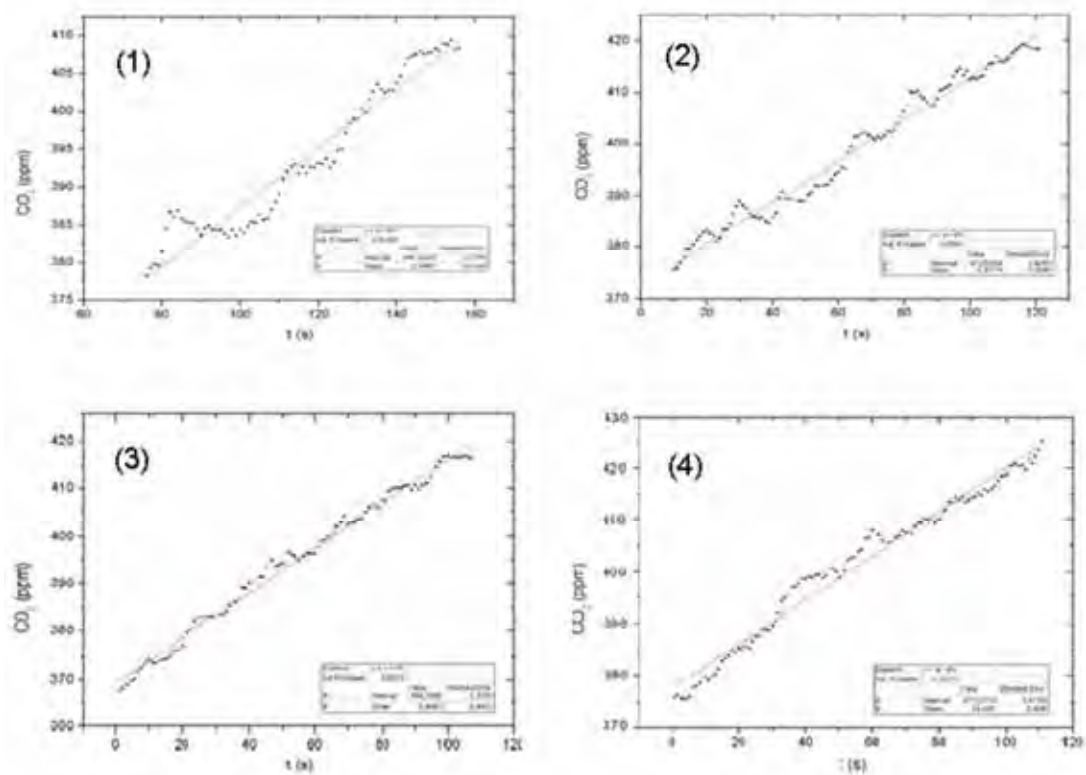


Figura 42: Tratamento das quatro primeiras curvas, das 23 obtidas na coleta, por fit linear.

Os dados obtidos para os fluxos das taxas de CO₂ bem como os fluxos obtidos para todas as 23 curvas obtidas estão relacionadas na tabela 3, assim como também as condições de campo como temperatura e pressão do ar.

O momento em que estes dados foram coletados se mostrou muito conveniente, uma vez que ocorreu em um pequeno espaço de tempo uma grande variação dos valores de temperatura e pressão ambiente, e muito provavelmente da umidade do solo, o que permitiu uma avaliação inicial destas variáveis e sua influência sobre o fluxo de CO₂ emitido pelo solo. Neste dia, no período da manhã o tempo se apresentava chuvoso e com temperatura ambiente por volta de 23°C, variando até 26°C em um período de cinco horas. A pressão do ar também sofreu variação, indo de 938,1 hPa até 935 hPa até o momento da última coleta.

Tabela 3: Dados referentes a todas as 23 curvas coletadas e os respectivos fluxos de CO₂.

Ref.	Horário	CO ₂ In. (ppm)	Coef. Anf.	T. Coleta (min)	Tempo Vent. (min)	H ₂ O(LU)(ppt)	H ₂ O(LCr)(%)	Pressão At. (hPa)	Temp. solo (°C)	Fluxo de CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹)
1	10:30	380	0,39067	4	2	94,4	66	938,1	23,6	5,497492725
2	10:40	370,5	0,40174	4	2,5	42,3	66	938,1	23,6	5,653269326
3	10:47	365	0,46993	4	2,5	41,7	66	938,2	23,6	6,613541216
4	10:54	371	0,42597	4	4	42,498	65	938,4	23,7	5,996149851
5	11:03	372	0,43455	4	3	42,6	65	938,5	23,8	6,117577728
6	11:10	364,5	0,53116	4	4	43,55	65	938,8	23,9	7,480039788
7	11:19	373	0,54955	4	4	44	65	939,1	24	7,715423675
8	11:25	370	0,56993	4	4	44,5	65	939,2	24,2	8,002401339
9	11:35	372,5	0,53756	4	2	44,6	64	939	24,3	7,54628606
10	11:40	366	0,61039	4	2	45,3	64	938,8	24,4	8,56685108
11	11:46	366	0,52654	4	1,5	45,3	64	938,7	24,5	7,389225385
12	11:53	364	0,46187	4	1,5	45,5	63	938,7	24,6	6,481675711
13	11:58	364	0,5584	4	2,5	45,8	63	938,5	24,6	7,834664672
14	13:18	370	0,58421	4	6	44,3	60	937,4	25,5	8,132422314
15	13:28	374	0,61486	4	7	44,3	60	937,2	25,5	8,557255678
16	13:39	367	0,65184	4	6	44,4	60	936,9	25,6	9,038787315
17	13:50	374	0,62327	4	8	44,7	59	936,7	25,6	8,640774369
18	14:00	378	0,61814	4	30	44,3	58	936,4	25,8	8,5669094
19	14:35	380	0,74228	4	6	43,5	57	936	26	10,28299274
20	14:47	380	0,6385	4	8	44	56	935,6	26	8,843412104
21	15:00	384	0,61173	4	20	45	52	935,6	26,3	8,470828979
22	15:23	392	0,67969	4	5,5	43,3	51	935,3	26,6	9,37761708
23	15:33	393	0,68479	4	11	43,7	51	935,2	26,5	9,44697113

A partir dos dados obtidos para o fluxo de CO_2 e associados a essa variação dos dados de temperatura do solo e pressão do ar coletados durante o período de coleta, os seguintes gráficos puderam ser construídos relacionando estas variáveis.

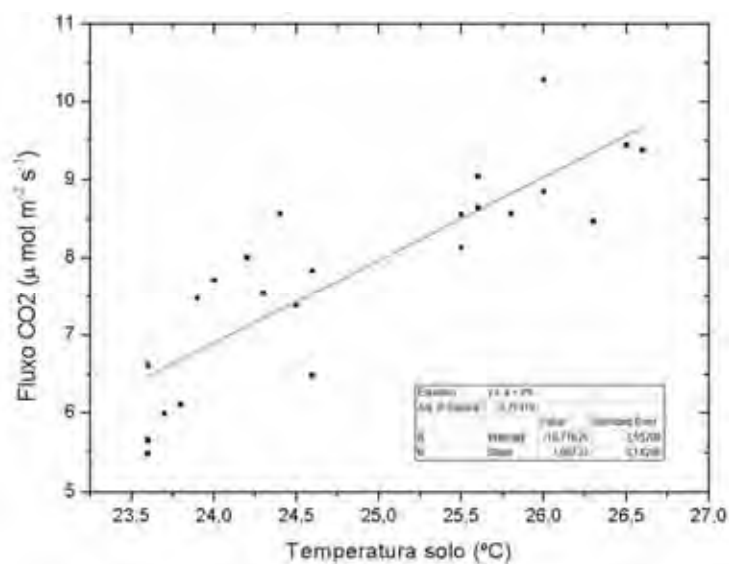


Figura 43: Fluxo de CO_2 em função da temperatura do solo.

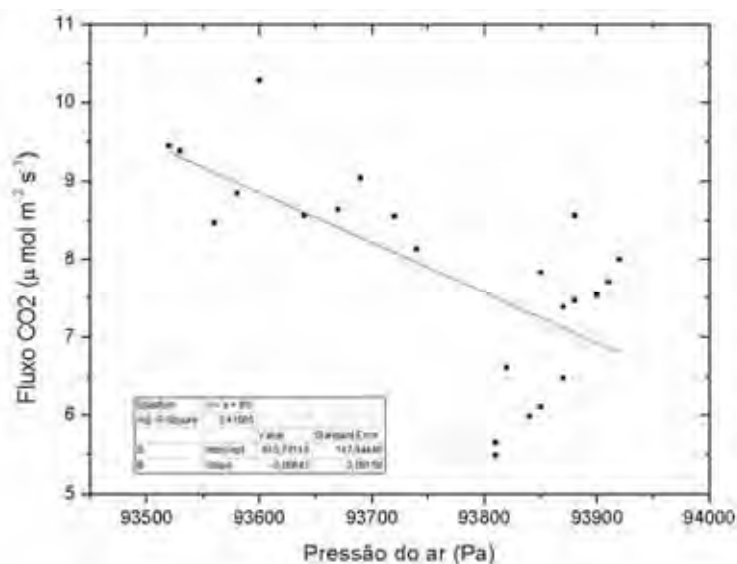


Figura 44: Fluxo de CO_2 em função da pressão do ar.

A partir destes dois gráficos podemos observar pelas figuras 44 e 45 a influência destas variáveis ambientais sobre o fluxo de CO₂ emitidos pelo solo. Segundo a literatura, a temperatura é um dos principais fatores condicionantes da respiração do solo e conseqüentemente da produção de CO₂, pelo fato de acelerar a atividade microbiana do solo.

Podemos concluir que o sistema de câmara dinâmica é eficiente na determinação dos fluxos de CO₂ do solo. Observou-se também que a queda da pressão na atmosférica também pode ter contribuído com o aumento da respiração do solo.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresenta uma contribuição ao estudo e quantificação dos fluxos de CO₂ na respiração do solo por intermédio da instrumentação desenvolvida, representando assim uma alternativa aos diversos sistemas comerciais empregados para tal, e disponíveis no mercado.

Á partir de apenas um analisador de gás infravermelho (IRGA), modelo LI-840 da Li-Cor, foi possível o desenvolvimento de um equipamento similar ao modelo LI-8100, sistema automático para análise de fluxo de CO₂ do solo, também fabricado pela Li-Cor. Dentre as vantagens apresentadas pelo modelo desenvolvido à partir de uma unidade LI-840, representado na figura 38, estão o baixo custo total em comparação a modelos similares disponíveis no mercado, a facilidade e o baixo custo de manutenção uma vez que todas as peças e partes componentes do sistema estão disponíveis no mercado nacional e são de fácil acesso.

A automação da câmara dinâmica se mostrou muito funcional, na medida em que permitiu uma grande facilidade de manuseio e coleta, especialmente para um grande volume de dados. Podendo inclusive ser operada por apenas uma pessoa em campo, permitindo que o operador possa dar atenção a outros aspectos do estudo, como controle da temperatura e umidade local, além de outras variáveis climáticas, durante o processo de coleta.

O uso de um computador adicional, representado pela maleta de controle e armazenamento de dados se mostrou um recurso muito interessante, pois por se tratar de um computador completo, não apenas um sistema dedicado de armazenamento de dados, este conta com todos os recursos que um computador convencional pode oferecer, em especial quanto aos recursos de comunicação disponíveis. Assim, se no local de coleta, ou em suas proximidades houver a disposição acesso a rede de comunicação, como internet, seja por cabeamento ou sem fio, tem se a possibilidade não apenas do acompanhamento do processo de coleta, mas também do controle à distância de todo o processo, especialmente da câmara automática que poderá ser operada a distância e a aquisição dos dados resultantes obtidos remotamente, sem a necessidade de um operador no local.

Este recurso poderá ser de especial interesse quando se desejar realizar o estudo de respiração do solo por longos períodos de tempo e onde não há a possibilidade de permanência constante de um operador.

O sistema desenvolvido se mostrou eficiente na determinação dos fluxos de CO_2 , e os dados obtidos para os fluxos estão dentro dos encontrados na literatura e em outros estudos referentes à respiração do solo. A influência de fatores ambientais como a temperatura também puderam ser constatadas e foi possível confirmar a sua forte influência sobre a respiração do solo e a produção e liberação de CO_2 .

Foi observada em alguns casos durante a coleta, a saturação do sistema, onde após a abertura da câmara os níveis de CO_2 não voltam aos mesmos níveis iniciais da medida anterior. Esta saturação do sistema não é a mesma da saturação da câmara fechada durante a coleta devido ao equilíbrio da pressão interna no interior da câmara fechada. Esta saturação do sistema não foi uma constante, não ocorrendo em boa parte das medidas. Acredita-se que este fato se deve a uma ventilação irregular da câmara, durante a sua abertura. Faz-se necessário uma melhor avaliação para entendimento e eliminação da ocorrência da saturação do sistema.

7 RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho permite ainda que outros aspectos referentes ao estudo da respiração e fluxo de CO_2 do solo possam ainda ser desenvolvidos. Dentre os aspectos pode-se destacar:

- Estudo da variação do fluxo de CO_2 associados à sazonalidade, para diversos ambientes, urbanos e florestais e agrícolas.
- Adaptação do sistema para coleta e estudo de outros gases tais como CH_4 , com a substituição do módulo do analisador LI-840, destinado apenas a detecção de CO_2 .
- Adaptação do sistema para estudo de emissões de fluxo de gases, especialmente o CO_2 , na superfície de rios e lagos, pelo acoplamento da câmara automática a uma base flutuante.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] LEÓDIDO, Leonardo Moreira. **Desenvolvimento de métodos e meios para a calibração dinâmica de transdutores de gases de efeito estufa**. 2006. xiv, 106p, Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2006.

[2] Pedro L. O. de A. Machado. **Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global**. Quim. Nova, Vol. 28, No. 2, 329-334, 2005

[3] FREITAS, H. ; da Rocha, H. R. . **Variabilidade sazonal do efluxo de CO₂ do solo sobre floresta tropical úmida e pastagem em Rondônia**. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, 2000, Rio de Janeiro, RJ, p. 2378-2. XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, 2000. p. 2378-2387.

[4] DIAS, Jadson Dezincout. **Fluxo de CO₂ proveniente da respiração do solo em áreas de florestas da Amazônia**. 2006. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura Luis de Queiros, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

[5] CARNEIRO, Janaína Viário. **Fluxos turbulentos de CO₂ em uma área de arroz irrigado no RS**. 2007. 19p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

[6] KEELING, Charles David; Charles David Keeling Tyler Prize Presentation; Disponível em <<http://scrippsco2.ucsd.edu/home/index.php>>; Acesso em: 15 de maio de 2011.

[7] Gavin Schmidt; Joshua Wolfe. **Climate Change: Picturing the Science**. W.W. Norton, 2009

[8] MOREIRA, Maurício Alves. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2005. p. 307-314.

[9] ZANCHI, Fabrício Berton. **Medição do efluxo de CO₂ do solo com câmaras automáticas sobre floresta em Rondônia**. 2004. 0 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

[10] HARRIS, Daniel C. **Análise química quantitativa**. 5. ed.: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1999.

[11] McMURRY, John. **Química orgânica**. 6 ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2005.

[12] ARAUJO PANTOJA, Patrícia. **Aplicação da espectroscopia de infravermelho próximo na caracterização da carga de petróleo para o processo de destilação atmosférica**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

[13] ROMANO, Rodrigo Alvite. **Modelagem e controle de CO₂ em câmaras de topo aberto utilizadas em estudos de fisiologia vegetal**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

[14] **LICOR, Manual LI-840**. Disponível em: <http://ftp.licor.com/env/LI-840/Manual/LI-840_Manual.pdf>. Acesso em: 20 de abril 2010.

[15] PINTO JÚNIOR, O. B. ; SANCHES, Luciana ; NOGUEIRA, José de Souza ; VOURLITIS, George Louis . **Estimativa de Q10 por meio do efluxo de CO₂ no solo na estação seca numa floresta tropical de transição amazônica**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 21, p. 1-5, 2006.

[16] Burba, G., and D. Anderson. **A Brief Practical Guide to Eddy Covariance Flux Measurements: Principles and Workflow Examples for Scientific and Industrial Applications**. 2010 LI-COR Biosciences, Lincoln, USA, Hardbound and Softbound Editions, 211pp.

[17] SALIMON, Cleber Ibraim. **Respiração do solo sob florestas e pastagens na Amazônia sul - ocidental, Acre**, 2003. 97p.: il. Tese (doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

[18] CAMPOS, Dinailson Corrêa de, **Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para o sequestro de carbono**. 2003. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiros, Piracicaba, 2003.

[19] BARAN, Flávio Daniel. **Avaliação de uma floresta de eucaliptos na presença de um mercado de certificados para reduções de emissões de carbono : uma abordagem por opções reais**. 2005. 112 f. : il. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2005.

[20] FERREIRA JUNIOR, M. J. A. ; FURTADO NETO, A. T. ; FIGUEIRA, A. P. B. ; MACHADO, W. B. ; TAPAJÓS, R. ; AGUIAR, D. R. ; SILVA, H. C. P. ; SILVA, R. . **Fluxos de dióxido de carbono na interface solo atmosfera na Floresta Nacional do Tapajós o ano de 2005**. *Ciência e Natura*, v. VI, p. 145-148, 2009.

[21] FURTADO NETO, A. T.; FERREIRA JUNIOR, M. J. A. ; MACHADO, W. B. ; TAPAJÓS, R. ; FIGUEIRA, A. P. B. ; AGUIAR, D. R. ; SILVA, H. C. P. ; SILVA, R. . **Efluxo de CO₂ do solo em uma área de bosque localizada no Campus II da UFPA, Santarém-PA**. *Ciência e Natura*, v. VI, p. 117-120, 2009.

[22] GOUVÊA, Julia Ribeiro Ferreira. **Mudanças climáticas e a expectativa de seus impactos na cultura da cana-de-açúcar na região de Piracicaba-SP.** 2008. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

[23] A.P. Correia; J.S. Pereira, G. Pita, M. Carneiro, C. Nogueira, J. Silva, A. Rodrigues, A. Fabião, M. Madeira, J. Banza¹. **Balço de Carbono no Eucalipto – Comparação entre o Fluxo Turbulento de CO₂ e a Estimativa do Modelo CO2FIX V3.1.** 2005 - Instituto Superior de Agronomia, Tapada da Ajuda, 1349-018 LISBOA.

[24] ARMANI, G. ; MAGALHÃES, R.B.S ; CHRISTOFOLETTI, S. R. ; Timoni, J.L. ; Roviolo, A.L.. **Análise microclimática comparativa entre a Floresta Estadual Edmundo Navarro de Andrade e a área urbana do município de Rio Claro..** HOLOS Environment (Online), v. 10/2, p. 30-50, 2010.

[25] GALLON, M. M. P.; SANCHES, L.; PAULO, S. R. **Fluxo e perfil de dióxido de carbono no dossel uma floresta tropical de transição amazônica.** Revista Brasileira de Meteorologia, v.21, n.3b, 291-300, 2006.