

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**DESEMPENHO DE UM SISTEMA EMBARCADO  
PARA MEDIÇÃO DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO DA  
DIFERENÇA NORMALIZADA UTILIZANDO  
LED OU TSL 2561**

**ARMANDO DA SILVA FILHO**

**PROF. Dr. MARCELO SACARDI BIUDES  
Orientador**

**Cuiabá, MT  
Dezembro de 2019**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**DESEMPENHO DE UM SISTEMA EMBARCADO  
PARA MEDIÇÃO DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO DA  
DIFERENÇA NORMALIZADA UTILIZANDO  
LED OU TSL 2561**

**ARMANDO DA SILVA FILHO**

*Tese apresentada ao Programa de  
Pós-graduação em Física Ambiental  
da Universidade Federal de Mato  
Grosso, como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Doutor em  
Física Ambiental.*

**PROF. Dr. MARCELO SACARDI BIUDES  
Orientador**

**Cuiabá, MT  
Dezembro de 2019**

### **Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.**

D111d da Silva Filho, Armando.

DESEMPENHO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA MEDIÇÃO DE  
ÍNDICE DE VEGETAÇÃO DA DIFERENÇA NORMALIZADA UTILIZANDO  
LED OU TSL 2561 / Armando da Silva Filho. -- 2019

51 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Marcelo Sacardi Biudes.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física,  
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2019.

Inclui bibliografia.

1. instrumentação microclimáticas. 2. microcontroladores PIC. 3. cobertura vegetal.  
I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.**

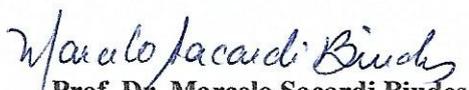
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO**  
**INSTITUTO DE FÍSICA**  
**Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

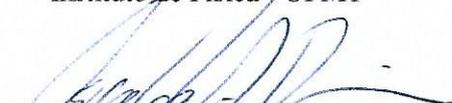
**TÍTULO: DESEMPENHO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA  
MEDIÇÃO DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO DA DIFERENÇA  
NORMALIZADA UTILIZANDO LED OU TSL 2561**

**AUTOR: ARMANDO DA SILVA FILHO**

Tese de Doutorado defendida e aprovada em 18 de dezembro de 2019, pela comissão julgadora:

  
**Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes**  
**Orientador**  
Instituto de Física - UFMT

  
**Profa. Dra. Nadja Gomes Machado**  
**Examinadora Interna**  
Instituto Federal de Mato Grosso – IFMT

  
**Prof. Dr. Osvaldo Alves Pereira**  
**Examinador Externo**  
Universidade de Cuiabá - UNIC

  
**Prof. Dr. Geison Jader Mello**  
**Examinador Externo**  
Instituto Federal de Mato Grosso – IFMT

  
**Prof. Dr. Carlos Alexandre Santos Querino**  
**Examinador Externo**  
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente (IEAA) – UFAM

## **AGRADECIMENTOS**

- Ao amigo e orientador, Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes, pela confiança no projeto e suporte acadêmico durante todo esse período.
- Ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira por sua preocupação constante com o bem estar dos alunos do programa.
- Aos colegas do Programa de Pós Graduação em Física Ambiental, pela amizade construída nestes anos de trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	I
LISTA DE TABELAS .....	III
LISTA DE QUADROS .....	IV
LISTA DE ABREVIACÕES E/OU SIMBOLOS .....	V
RESUMO .....	VI
ABSTRACT .....	VII
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. OBJETIVO .....	2
1.1.1. Objetivo Geral .....	2
1.1.2. Objetivo Específico .....	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	3
2.1. ASSINATURA ESPECTRAL .....	3
2.2. ASSINATURA ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO .....	4
2.3. ÍNDICE DE VEGETAÇÃO .....	5
2.4. ÍNDICE DE VEGETAÇÃO DA DIFERENÇA NORMALIZADA .....	6
2.5. PLATAFORMAS PARA MEDIÇÃO DO NDVI .....	7
2.6. DIODO COMO ELEMENTO SENSOR .....	8
2.6.1. Polarização Direta .....	9
2.6.2. Polarização Reversa .....	9
2.7. FOTODIODO COMO ELEMENTO SENSOR .....	10
2.7.1. Modo Fotovoltaico .....	10
2.7.2. Modo fotocondutor .....	11
2.7.3. Corrente de Escuro .....	11
2.8. LED COMO ELEMENTO SENSOR .....	12
2.9. Sensor de luz TSL 2561 .....	13
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	15
3.1. CIRCUITO DE TESTES DE SELETIVIDADE DOS LEDs .....	15
3.2. DESENVOLVIMENTO DO DATALOGGER DO MEDIDOR PORTÁTIL DE NDVI .....	15
3.3. SENSORES ANALÓGICO E DIGITAL .....	16
3.3.1. LED 660nm .....	16
3.3.2. LED 850nm .....	17
3.4. FASE DE TESTES .....	18
3.4.1. Teste de Seletividade dos LEDs (teste de bancada) .....	18
3.4.2. Correção de largura de banda e ganho de resposta do sensor TSL 2561 ...	20
3.4.3. Testes com Sensores e Calibração em Plataforma fixa .....	21
3.4.4. Teste de leitura do NDVI em Diferentes Superfícies com protótipo .....	23
3.5. CÁLCULO DO NDVI .....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	25
4.1. TESTE DE SELETIVIDADE DOS LEDs .....	25
4.2. TESTE INICIAIS DOS SENSORES NA PLATAFORMA FIXA .....	25
4.3. TESTE DA RESPOSTA DOS SENSORES .....	27
4.4. MEDIDOR PORTÁTIL DE NDVI .....	29
4.5. MEDIÇÃO DA REFLETÂNCIA DAS BANDAS DE 660 NM E 850 NM E CÁLCULO DO NDVI PELO MEDIDOR PORTÁTIL .....	31
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	34
5.1. CONTRIBUIÇÕES .....	34
5.2. TRABALHOS FUTUROS .....	34
6. REFERÊNCIAS .....	35

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Assinatura espectral do solo (JENSEN, 2009).	3
<b>Figura 2.</b> Assinatura espectral da água (URREGO, 2015).	4
<b>Figura 3.</b> Absorção fotossintética em função do comprimento de onda.	4
<b>Figura 4.</b> Índice de refração na estrutura celular vegetal.	5
<b>Figura 5.</b> Variações dos valores de refletância entre as bandas do visível (400 a 730 nm) e do infravermelho (740 a 1400 nm) (CARVALHO JÚNIOR et al, 2005).	6
<b>Figura 6.</b> Refletividade da vegetação em função do comprimento de onda (SENTERA).	6
<b>Figura 7.</b> Reflectância vegetal, vermelho e infravermelho. (Autor)	7
<b>Figura 8.</b> Junção PN.	8
<b>Figura 9.</b> Zona de depleção.	8
<b>Figura 10.</b> Diodo polarização direta.	9
<b>Figura 11.</b> Diodo polarização reversa.	10
<b>Figura 12.</b> Zona de depleção no modo fotovoltaico (GUERREIRO et al, 2010).	11
<b>Figura 13.</b> Zona de depleção no modo fotocondutor (GUERREIRO et al, 2010).	11
<b>Figura 14.</b> Curva corrente de escuro.	12
<b>Figura 15.</b> Banda de valência e condução (NOVOA et al, 2009).	13
<b>Figura 16.</b> Intensidade de emissão por LEDs em função do comprimento de onda.	13
<b>Figura 17.</b> Curva característica do sensor TSL 2561 (TAOS).	14
<b>Figura 18.</b> Diagrama em blocos do sensor TSL 2561 (TAOS).	14
<b>Figura 19.</b> Diagrama elétrico do circuito para testes fixos (Autor).	15
<b>Figura 20.</b> LED 660 nm, 3 Watts (Autor).	16
<b>Figura 21.</b> Curva de resposta do LED 660 nm 3 watts (Autor).	17
<b>Figura 22.</b> LED 850 nm, 3 Watts (Autor).	17
<b>Figura 23.</b> Curva de resposta do LED 850 nm 3 watts.	18
<b>Figura 24.</b> Circuito elétrico para teste de seletividade do comprimento de onda (Autor).	18
<b>Figura 25.</b> Determinação da corrente máxima a pleno sol (Autor).	19
<b>Figura 26.</b> Montagem dos LEDs, colimadores e difusor. (Autor)	20
<b>Figura 27.</b> Curva de transmitância do acrílico, poliestireno e policarbonato.	20
<b>Figura 28.</b> Resposta espectral do TSL 2561 corrigida (Autor).	21
<b>Figura 29.</b> Refletância espectral para Gesso, NaCl, MgCl e CaCl.	21
<b>Figura 30.</b> Datalogger desenvolvido para os testes fixos (Autor).	22
<b>Figura 31.</b> Calibração dos sensores LEDs e TSL 2561 (Autor).	22
<b>Figura 32.</b> Disposição dos sensores para tomada de medidas de NDVI (Autor).	23
<b>Figura 33.</b> Cabeçote de leitura intercambiável (Autor).	23
<b>Figura 34.</b> Radiância medida pelos LEDs na banda de 660 nm (A) e 850 nm (B) e relação entre os dois LEDs de 660 nm (C) e de 850 nm(D).	26
<b>Figura 35.</b> Radiância medida pelos TSL 2561 na banda de 660 nm (A) e 850 nm (B) e relação entre os dois TSL 2561 de 660 nm (C) e de 850 nm(D).	27
<b>Figura 36.</b> Refletância da superfície lambertiana (NaCL) e da água medida pelos LEDs de 660 nm e 850 nm.	28
<b>Figura 37.</b> Refletância da superfície lambertiana (NaCL), palha e da água medida pelos TSL 2561 de 660 nm e 850 nm.	28
<b>Figura 38.</b> NDVI obtido pelos TSL 2561 e LEDs sobre uma superfície de grama verde.	29
<b>Figura 39.</b> Sonda intercambiável (Autor).	30
<b>Figura 40.</b> Medidor portátil de NDVI (Autor).	30

**Figura 41.** Reflectância das bandas 660 nm e 850 nm e NDVI obtido pelos sensores LED e TSL 2561 sobre uma superfície de NaCl, grama verde e palha.<sup>32</sup>

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1.</b> Resistores utilizadas para o teste de seletividade dos LEDs. ....	19
<b>Tabela 2.</b> Teste de seletividade de banda e sensibilidade dos LEDs. ....	25
<b>Tabela 3.</b> Teste de seletividade do TSL 2561. ....	25
<b>Tabela 4.</b> Valores das reflectâncias das bandas de 660 nm e 850 nm e NDVI utilizando LEDs e TSL 2561 como sensores.....	33

**LISTA DE QUADROS**

<b>Quadro 1.</b> Comprimento de onda e materiais semicondutores. Fonte: (NOVOA et al, 2009).....	12
--	----

**LISTA DE ABREVIACOES E/OU SIMBOLOS**

<b>ADC</b>	ANALOG TO DIGITAL CONVERTER
<b>AT</b>	ATTENTION
<b>FAT</b>	FILE ALLOCATION TABLE
<b>I<sup>2</sup>C</b>	INTER-INTEGRATED CIRCUIT
<b>LCD</b>	LIQUID CRYSTAL DISPLAY
<b>LED</b>	LIGHT EMITTING DIODE
<b>NaCl</b>	CLORETO DE SÓDIO
<b>NDVI</b>	NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX
<b>nm</b>	NANMETRO
<b>RS 232</b>	RECOMMEND STANDARD – 232
<b>RTC</b>	REAL-TIME CLOCK
<b>SD</b>	SECURE DIGITAL
<b>V</b>	VOLT
<b>VANT</b>	VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO
<b>W</b>	WATT

## RESUMO

**SILVA FILHO, A. DESEMPENHO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA MEDIÇÃO DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO DA DIFERENÇA NORMALIZADA UTILIZANDO LED OU TSL 2561.** Cuiabá, 2019, 51f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

O índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) é amplamente utilizado na caracterização dos diferentes tipos de vegetação e dos estádios fenológicos sob diferentes condições hídricas e nutricionais. Diversos elementos sensores podem ser utilizados para o desenvolvimento de um instrumento de medição do NDVI. O objetivo deste estudo foi desenvolver um sistema embarcado para medição do NDVI utilizando LEDs polarizados em modo fotocondutor para funcionarem como sensores ou o sensor digital de luminosidade TSL 2561. Uma superfície homogênea de NaCl foi utilizada na calibração das reflectâncias, as medições do NDVI foram obtidas em superfícies de água, NaCl, grama sem restrição hídrica e palha. Os dados obtidos demonstraram alta seletividade dos LEDs e seletividade parcial do sensor TSL 2561. Os testes estáticos ocorreram simultaneamente com os dois tipos de sensores e indicaram que os dois tipos de sensores se mostraram adequados para medidas de refletâncias e determinação do NDVI com uma correlação acima de 95% entre os sensores.

**Palavras-chave:** instrumentação microclimáticas, microcontroladores PIC, cobertura vegetal.

## ABSTRACT

**SILVA FILHO, A. PERFORMANCE OF AN EMBEDDED NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX MEASUREMENT SYSTEM USING LED OR TSL 2561.** Cuiabá, 2019, 51f. Dissertation (PhD in Environmental Physics) Institute of Physic, Federal University of Mato Grosso.

The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is widely used to characterize different vegetation types and phenological stages under different water and nutritional conditions. Several sensor elements can be used for the development of an NDVI measuring instrument. The objective of this study was to develop an embedded NDVI measurement system using two different sensor types, using photoconductor mode polarized LEDs to function as sensors or the TSL 2561 digital light sensor. A homogeneous NaCl surface was used in the reflectance calibration, NDVI measurements were obtained on water, NaCl, grass without water restriction and straw surfaces. The data obtained demonstrated high selectivity of the LEDs and partial selectivity of the TSL 2561 sensor. Static tests occurred simultaneously with both types of sensors and indicated that both types of sensors were suitable for reflectance measurements and NDVI determination with a correlation above. 95% between the sensors.

**Keywords:** Microclimate Instrumentation, PIC Microcontrollers, Plant Cover.

## 1. INTRODUÇÃO

Índices de vegetação são amplamente utilizados na caracterização dos diferentes tipos de vegetação, no estágio fenológico e condições hídricas e nutricionais vegetativos, baseado na resposta espectral. Dentre eles, destacasse o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) e vem sendo utilizado para diferentes propósitos e tipos de vegetação. Sua obtenção pode ser feita diretamente sobre a vegetação por radiômetros in loco ou por sensores a bordo de satélites.

Os radiômetros disponíveis no mercado para estimar o NDVI são voltados à pesquisa científica e possuem custo elevado ou são específicos para avaliação da saúde de determinadas culturas específicas. Atualmente este método de análise da vegetação tem atraído o interesse de empresas de assessoria agrícola, para receituário de adubação e controle fitossanitário, na automação agrícola voltada a agricultura de precisão para aplicações localizadas e governos para a estimativa de colheitas e monitoramento ambiental, por ser um método não invasivo, e resposta praticamente em tempo real. Nesse contexto o estudo e desenvolvimento de sensores e sistemas embarcados destinados à esta tecnologia ganha relevância por atender demandas acima citadas e reduzir a dependência de produtos importados.

Atualmente o uso de LEDs está bastante difundido e podem se comportar como bons sensores em bandas de radiação bem seletas devido suas características construtivas, baixo custo e robustez. Entretanto, ainda são poucos os estudos do uso do LED como sensores por não terem sido projetados para este fim. A tecnologia de LEDs de alta potência com grande área de semicondutor exposto ( $1 \text{ mm}^2$ ) proporciona alto ganho de corrente em comparação aos fotodiodos convencionais reduzindo significativamente a necessidade de amplificadores de sinais simplificando seu uso.

Além dos LEDs, sensores digitais disponíveis no mercado, como o TSL 2561, incorporam fotodiodos de várias bandas espectrais em um mesmo invólucro. Esses sensores embarcados incluem conversores analógicos digitais, controle de ganho programável, e interface de comunicação digital I<sup>2</sup>C, o que proporciona montagens compactas sem a necessidade de componentes eletrônicos assessoriais para seu funcionamento, além de apresentarem baixo custo o que torna bem atrativo para o estudo e comparação do desempenho destes dois tipos de sensores.

## **1.1. OBJETIVO**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

O objetivo deste estudo foi desenvolver um sistema embarcado para medição do NDVI ao nível da cultura utilizando LED ou TSL 2561.

### **1.1.2. Objetivo Específico.**

- Determinar a resposta dos LEDs a serem utilizados aos diferentes comprimentos de onda necessários a obtenção do NDVI;
- Testar as respostas dos sensores LEDs (660nm e 850nm) e TSL 2561 em condições de campo;
- Avaliar o sistema embargado desenvolvido na obtenção do NDVI, comparando com resultados de outros estudos.

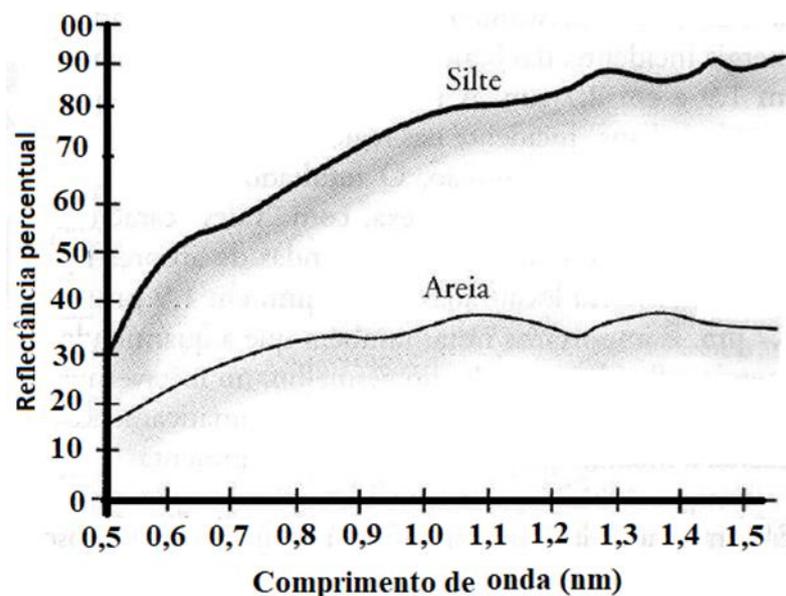
## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. ASSINATURA ESPECTRAL

Assinatura espectral é a intensidade relativa de energia eletromagnética com que os objetos refletem, absorvem e transmitem radiação eletromagnética em proporções que variam com o comprimento de onda, de acordo com as suas características biofísicas e químicas, (FLORENZANO, 2014)

Estas interações espectrais permitem a escolha da região do espectro sobre a qual pretende-se adquirir dados dos objetos devido a variação da porcentagem de energia refletida em cada comprimento de onda. (MORAES, 2005).

Tomando possível a identificação de solo água ou vegetais devido a assinatura espectral como é o caso do o comportamento espectral do solo (Figura 1) depende diretamente de sua composição química, física, biológica e mineralógica, sendo que os principais constituintes que afetam seu comportamento espectral são a matéria orgânica e os óxidos de ferro (DALMOLIN et al, 2005).



**Figura 1.** Assinatura espectral do solo (JENSEN, 2009).

A água por sua vez apresenta características de refletâncias bem diferentes de objetos sólidos. (Figura 2) devido processos de absorção e espalhamento da radiação no seu interior (CABRAL, 2003). Tendo principais responsáveis pelo espalhamento da radiação na água, as partículas suspensas como bactérias, células dos fitoplactons, detritos orgânicos e inorgânicos, enquanto os principais absorvedores da radiação são os pigmentos fotossintéticos, detritos orgânicos e matéria orgânica (FEREIRA, 2009). Esses componentes absorvem toda a radiação eletromagnética abaixo de 380 nm e acima de 700 nm. Mesmo dentro dessa faixa,

a refletância da água limpa no estado líquido é relativamente pequena, ultrapassando pouco mais de 5% (OLIVEIRA, 2012).

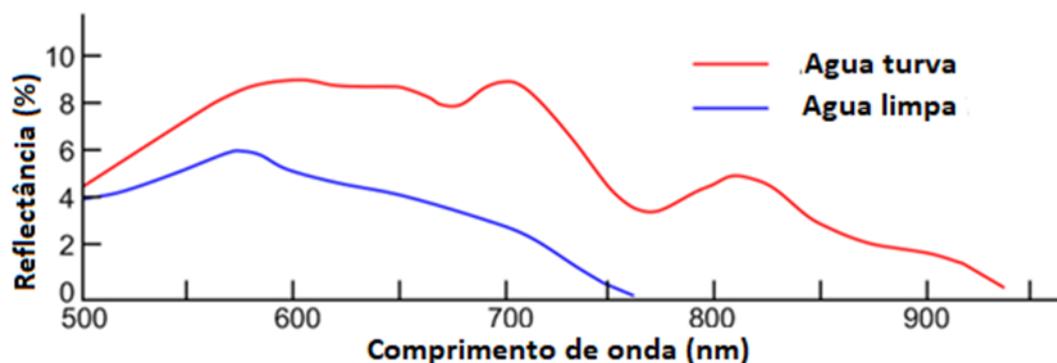


Figura 2. Assinatura espectral da água (URREGO, 2015).

## 2.2. ASSINATURA ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO

A resposta espectral média da vegetação fotossinteticamente ativa pode ser dividida em três regiões distintas (Figura 3). A primeira, que compreendem o espectro visível (400 nm até 700 nm), apresenta baixa refletância devido a absorção da radiação por carotenoides e clorofilas a e b, com picos de absorção entre 400 nm até 450 nm (azul) e 600 nm até 730 nm (SIMÕES, 2003).

A segunda região compreende a faixa do infravermelho próximo (740 nm até 1300 nm). Essa região apresenta alta refletância pela vegetação devido a estrutura celular (Figura 4) que causa a mudança do índice de refração nas áreas frontais de ar/célula do mesófilo das folhas (ALVES et al, 2007). A terceira faixa compreende o infravermelho médio, e é fortemente influenciado pelo teor de água contido nas folhas, o qual provoca bandas de absorção em 1400 e 1950 nm e diminui a refletância da curva espectral da cultura (ALVES et al, 2007).

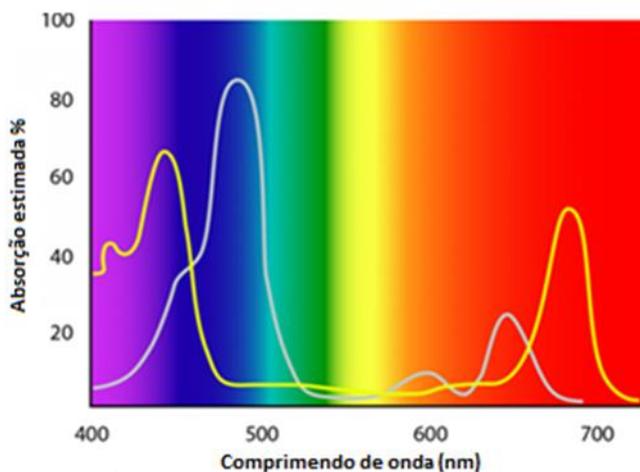
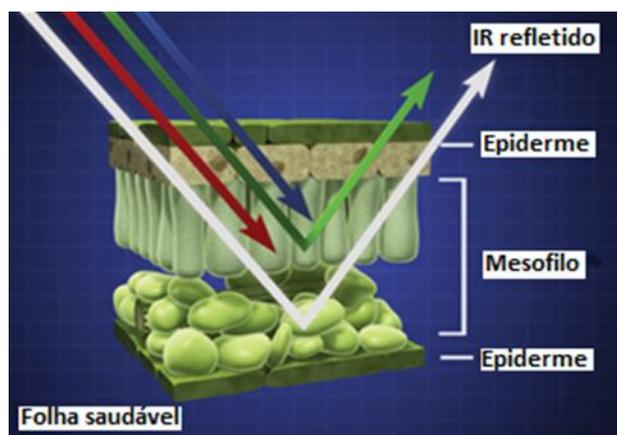


Figura 3. Absorção fotossintética em função do comprimento de onda. (SIMÕES, 2003).



**Figura 4.** Índice de refração na estrutura celular vegetal. (ALVES et al, 2007).

A complexidade das estruturas vegetais (Figura 4) determinam um comportamento espectral padrão para as diferentes espécies vegetais que leva a cada espécie vegetal possuir uma forma específica de resposta espectral. Cada qual tem padrão específico, a depender das condições fitossanitárias, nutricionais e hídrica da vegetação, que fornece subsídios em estudos sobre tomada de decisão sobre manejo adequado (BRITO et al, 2013).

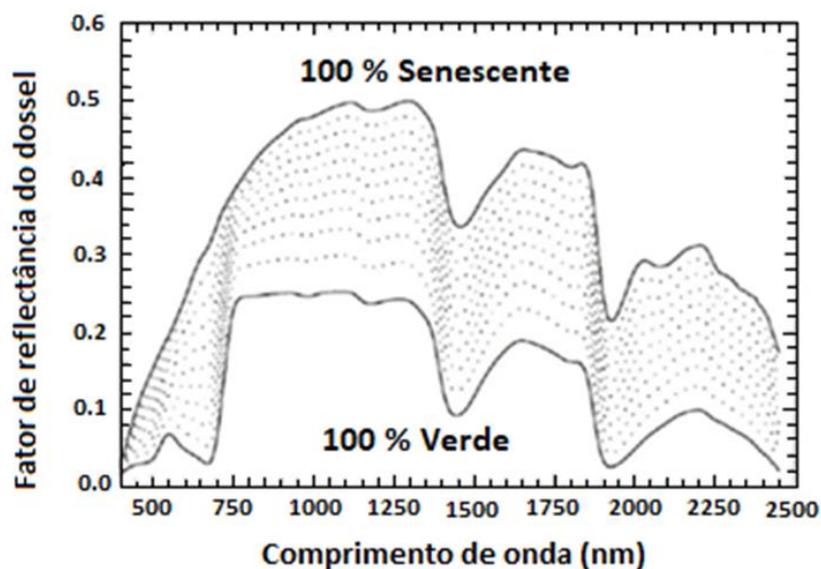
Desde a década de 1960, o estudo das características espectrais da vegetação, principalmente na banda do visível e do infravermelho próximo, têm se desenvolvido por meio de índices de vegetação com importantes resultados encontrados nas suas aplicações que fornecem dados para análises edáficas, climáticas, temporais e fenológicas, uma vez que diversos índices foram elaborados para diferentes finalidades seu uso deve seguir recomendações, com o objetivo de se obter os dados mais próximos da realidade (VIGANÓ, 2011).

### 2.3. ÍNDICE DE VEGETAÇÃO

As diferenças e variações nos valores de refletância entre as bandas do visível (400 a 730 nm) e do infravermelho (740 a 1400 nm) constituem a base da formação dos índices de vegetação (XUE et al, 2017). Esses índices são modelos matemáticos desenvolvidos para avaliar a cobertura vegetal, diagnosticar cobertura foliar, biomassa, porcentagem de cobertura do solo, atividade fotossintética e produtividade (MARCUSSE et al, 2010).

Os índices de vegetação são algoritmos customizados desenvolvidos e testados para uma variedade de aplicações e combinam radiação de luz visível e espectro infravermelho para obter quantificações representativas da superfície da vegetação, por responder de forma diferenciada aos comprimentos de ondas em função do seu estágio fenológico (Figura 5). Esses índices são adaptados aos

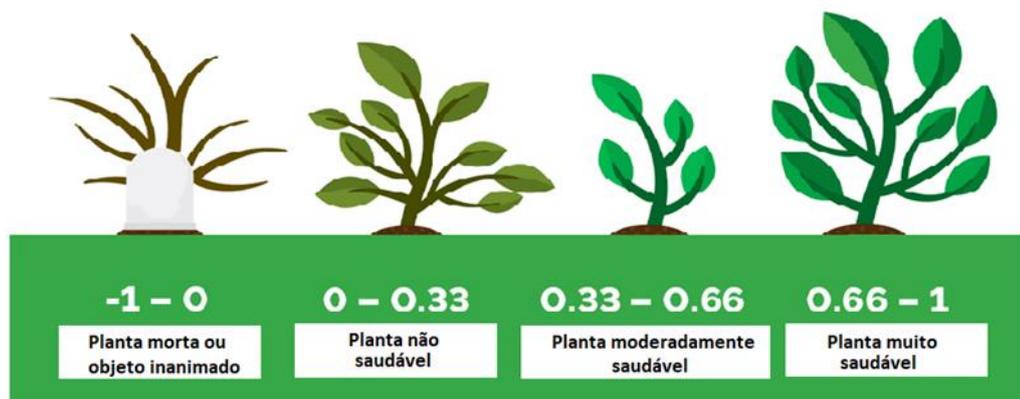
requisitos específicos da aplicação, necessidade de adubação, doenças fúngicas, estresse hídrico, em campo (XUE et al, 2017). Quase todos os índices de vegetação são baseados em bandas de infravermelho próximo (NIR) e vermelho (R). Em geral, a refletância na faixa vermelha depende do conteúdo de clorofila e da refletância no infravermelho próximo na estrutura interna da célula vegetal (MRÓZ et al, 2004).



**Figura 5.** Variações dos valores de refletância entre as bandas do visível (400 a 730 nm) e do infravermelho (740 a 1400 nm) (CARVALHO JÚNIOR et al, 2005).

#### 2.4. ÍNDICE DE VEGETAÇÃO DA DIFERENÇA NORMALIZADA

O índice de vegetação da diferença normalizada (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI) é muito utilizado não somente em estudos ambientais, mas também na agricultura. Por meio do NDVI é possível fazer diferentes tipos de análises nas mais diversas escalas de uma determinada região ou plantação, tornando este índice um bom estimador das condições biofísicas da vegetação analisada (Figura 6).



**Figura 6.** Refletividade da vegetação em função do comprimento de onda (SENTERA).

O NDVI foi proposto por ROUSE, J.W em 1974, e permite eliminar efeitos topográficos e variações no ângulo de iluminação solar, bem como outros elementos atmosféricos, como neblina (MRÓZ et al, 2004). O NDVI é utilizado com êxito, para a identificação das variabilidades ecológicas e ambientais, na disponibilidade hídrica, nutrientes no solo, e presença de pragas agrícolas.

Desta forma, é importante a evolução e disseminação do conhecimento sobre a aplicação do índice NDVI, como por exemplo, em equipamentos portáteis, como forma de otimizar a identificação de aspectos importantes para áreas de preservação de recursos naturais ou a disseminação de doenças na vegetação antrópica, como pastos, lavouras, florestas plantadas, etc. (JUNIO, 2017). O NDVI foi calculado utilizando como base a Equação (1) onde  $\rho_{IV}$  são os valores medidos para o infravermelho próximo e  $\rho_V$  os valores medidos para o vermelho (Figura 7).

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (1)$$

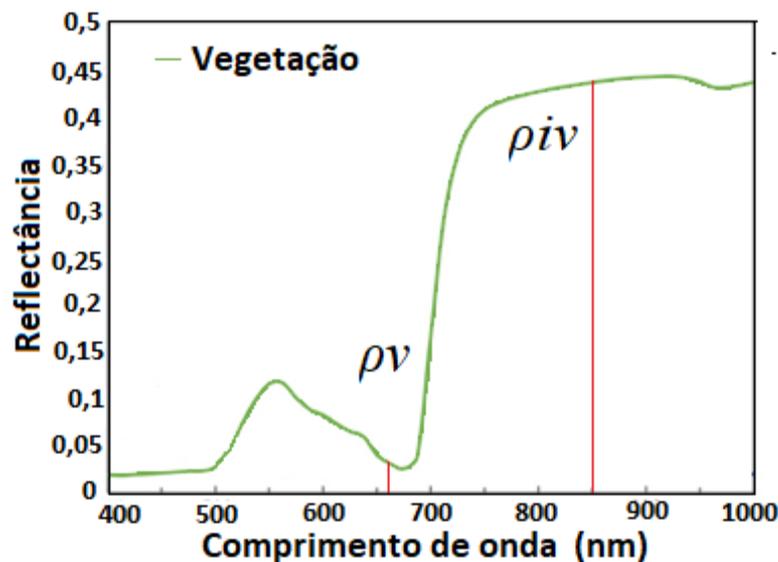


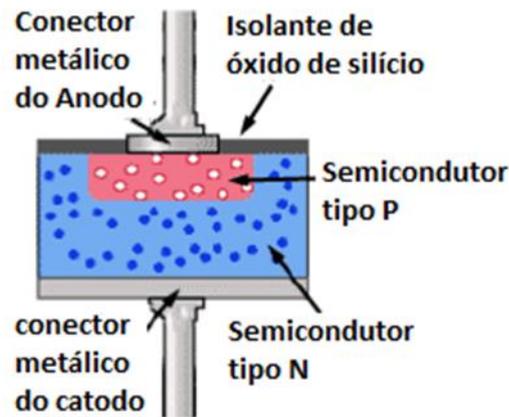
Figura 7. Reflectância vegetal, vermelho e infravermelho. (Autor)

## 2.5. PLATAFORMAS PARA MEDIÇÃO DO NDVI

O NDVI pode ser medido por meio de 3 plataformas distintas, dispostas de sensores para medição da radiância em bandas específicas: orbitais, através de satélites; aéreas, através de aviões e mais recentemente por drones e VANTs (veículo aéreo não tripulado); e em nível de solo. As medidas em nível de solo são mais adequadas quando o alvo em análise se limita a área de poucos metros, em um tipo de vegetação específica, e ou leituras diárias de um alvo (MAIO et al. 2008; STEFFEN).

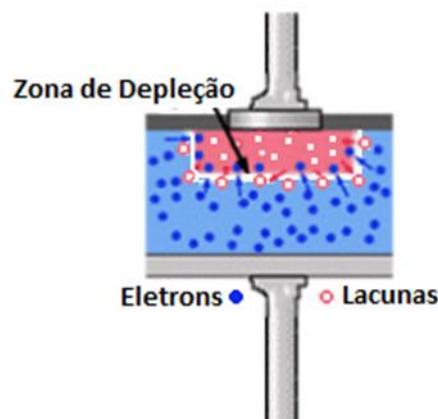
## 2.6. DIODO COMO ELEMENTO SENSOR

O diodo semiconductor é composto por uma lâmina de um cristal semiconductor podendo ser de silício ou germânio cujas faces opostas são dopadas por diferentes materiais durante sua construção, causando a polarização P tornando uma região mais eletropositiva em relação ao silício e N, região predominante eletronegativa em suas faces (Figura 8).



**Figura 8.** Junção PN. (E. COATES 2016)

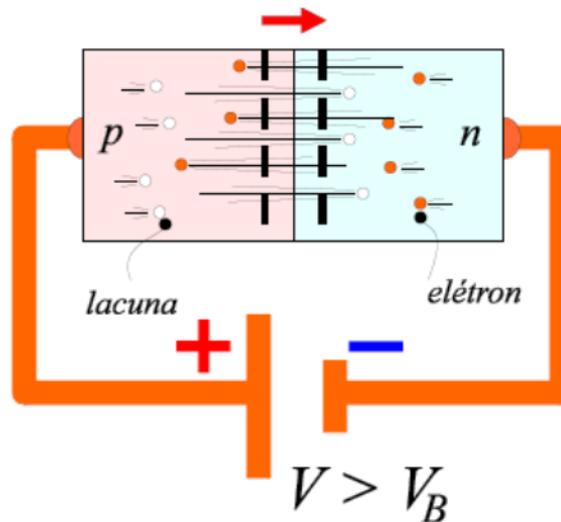
Para a formação de cristais P são usados elementos trivalentes dopantes (alumínio, boro ou gálio), e para a face N, elementos pentavalentes (arsênio, antimônio ou fósforo), os elementos dopantes trivalentes são elementos aceitadores de elétrons e os elementos pentavalentes doadores de elétrons. O termo junção refere-se à área de fronteira das duas regiões polarizadas do semiconductor e em torno da junção encontra-se a zona de depleção (Figura 9) que forma uma barreira de potencial que ocorre devido a recombinação entre lacunas e elétrons dos cristais PN durante a fabricação do diodo. No caso do silício esta barreira de potencial é de cerca de 0.6 V e o germânio é 0,3 V (PERES, 2000).



**Figura 9.** Zona de depleção. (E. COATES 2016)

### 2.6.1. Polarização Direta

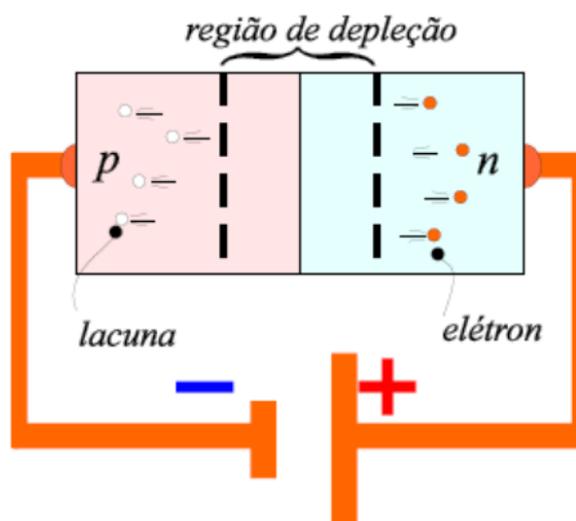
Uma vez que a tensão aplicada entre ânodo e catodo seja maior do que o potencial da zona de depleção (Figura 10). As recombinações entre elétrons e lacunas iniciam na junção entre a bandas de valência e de condução do semiconductor formando elétrons livres em escala exponencial esgotando o potencial da zona de depleção que passa a apresentar uma resistência muito próxima de zero (PERES, 2000).



**Figura 10.** Diodo polarização direta. (Wendling M. 2011)

### 2.6.2. Polarização Reversa

Quando o diodo é polarizado de modo reverso, elétrons do cristal N são atraídos para a tensão positiva e lacunas atraída para o negativo aumentando a zona de depleção (Figura 11), ocorrendo apenas a corrente de fuga reversa devido atividade térmica do material semiconductor, que liberam alguns elétrons livres que formam uma pequena corrente de fuga de apenas alguns nano-Amperes (nA) no caso do silício (PERES, 2000).



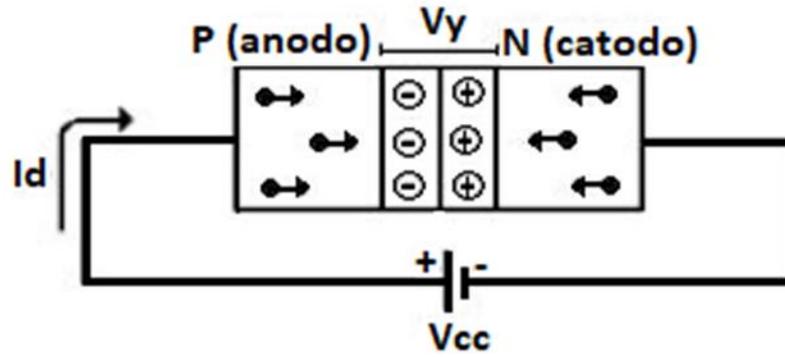
**Figura 11.** Diodo polarização reversa. (Wendling M. 2011)

## 2.7. FOTODIODO COMO ELEMENTO SENSOR

Fotodiodo é um diodo com a junção semicondutora exposta que converte a luz incidente em corrente elétrica, quando os fótons atingem a junção P-N excitando elétrons da banda de valência que saltam para a banda de condução produzindo uma corrente elétrica proporcional a área da junção exposta, podendo o fotodiodo funcionar no modo fotovoltaico gerando tensão elétrica em seus terminais ou no modo fotocondutor com a aplicação de uma tensão reversa em seus terminais forçando o aumento da zona de depleção.

### 2.7.1. Modo Fotovoltaico

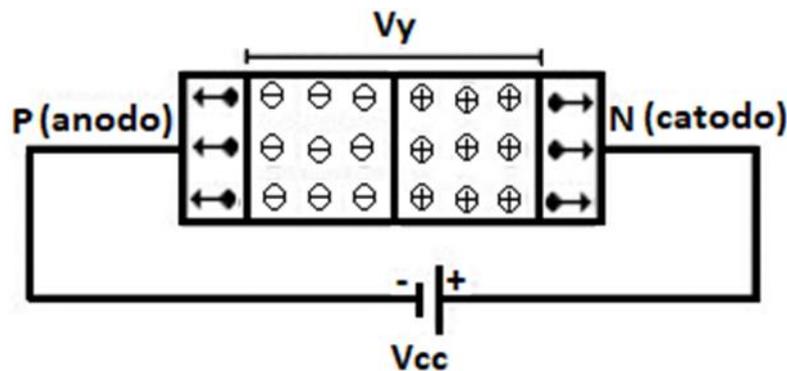
A radiação incidente na junção P-N gera uma diferença de potencial em seus terminais proporcional a área de exposição, e operando próximo ao curto circuito a corrente gerada será proporcional à radiação recebida na junção (Figura 12). Uma vez que a o modo fotovoltaico trabalha com uma resistência próxima ao curto circuito as tensões geradas são muito baixas inviabilizando seu uso para sensores de radiação (GUERREIRO et al, 2010).



**Figura 12.** Zona de depleção no modo fotovoltaico (GUERREIRO et al, 2010).

### 2.7.2. Modo fotocondutor

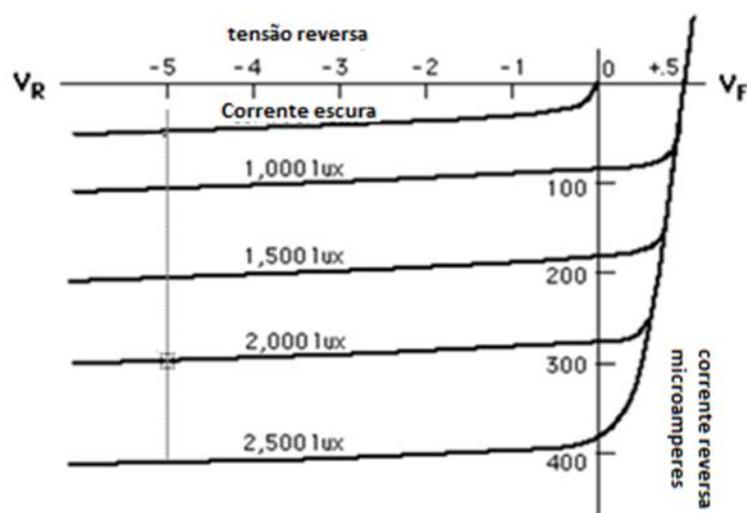
No modo fotocondutor uma polarização reversa é aplicada nos terminais do fotodiodo, criando uma região desprovida de carga elétrica livre na junção P-N (Figura 13). Isso faz com que o diodo adquira característica isolante na zona de depleção (ABREU et al, 2014), que quando sofre a incidência de uma radiação luminosa com energia capaz de remover elétrons das ligações da junção P-N e provocar o movimento de elétrons e lacunas. Por conseguinte, ocasiona o surgimento de uma corrente elétrica reversa ou corrente de fuga, proporcional à radiação luminosa recebida na junção, com alta impedância que é favorável para sensores com pequenas áreas expostas.



**Figura 13.** Zona de depleção no modo fotocondutor (GUERREIRO et al, 2010).

### 2.7.3. Corrente de Escuro

A corrente de escuro (Figura 14) é a corrente que é gerada no fotocondutor mesmo sem a presença de radiação luminosa, devido a termo excitação que pode ser facilmente excluída por filtros acoplados ao detector (CLARO, 2013).



**Figura 14.** Curva corrente de escuro. (CLARO, 2013)

## 2.8. LED COMO ELEMENTO SENSOR

LED ou diodo emissor de luz é um dispositivo semicondutor com a capacidade de emitir radiação em determinados comprimentos de ondas compreendidos entre o infravermelho e o ultravioleta. O comprimento de onda emitido depende do material dopante usado na junção P-N (Quadro 1).

**Quadro 1.** Comprimento de onda e materiais semicondutores. Fonte: (NOVOA et al, 2009).

Cor	Comprimento de onda (nm)	Diferença de potencial (ddp)	Material semicondutor
Infravermelho	$\lambda > 760$ nm	$\Delta v < 1,9$ V	<i>GaAs, GaAlAs</i>
Vermelho	$610 < \lambda > 760$ nm	$1,6 < \Delta v > 2,03$ V	<i>GaAlAs, GaAsP, AlGaInP, GaP</i>
Laranja	$590 < \lambda > 610$ nm	$1,6 < \Delta v > 2,1$ V	<i>GaAsP, AlGaInP, GaP</i>
Amarelo	$570 < \lambda > 590$ nm	$2,1 < \Delta v > 2,18$ V	<i>GaAsP, AlGaInP, GaP</i>
Verde	$500 < \lambda > 570$ nm	$2,18 < \Delta v > 4$ V	<i>InGaN, GaN, GaP, AlGaInP</i>
Azul	$450 < \lambda > 500$ nm	$2,48 < \Delta v > 3,7$ V	<i>ZnSe, InGaN, SiC</i>
Violeta	$400 < \lambda > 450$ nm	$2,76 < \Delta v > 4$ V	<i>InGaN</i>
Ultravioleta	$\lambda < 400$ nm	$3,1 < \Delta v > 4,4$ V	<i>AlN, AlGaIn, AlGaInN</i>

Os elementos semicondutores das junções determinam a diferença dos níveis de energia necessário para que ocorram os saltos dos elétrons da banda de maior energia para outra de menor energia na junção. Por conseguinte, libera energia na forma de fótons na mesma faixa espectral, formando a luz monocromática característica dos LEDs (Figuras 15 e 16) (ABREU, 2014).

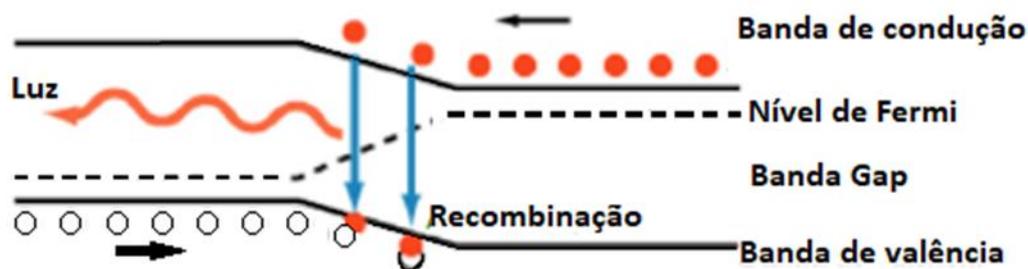


Figura 15. Banda de valência e condução (NOVOA et al, 2009).

Da mesma forma que um fotodiodo, quando um LED é usado na polarização reversa, a zona de depleção aumenta funcionando como um sensor fotovoltaico apresentando uma sensibilidade como resposta espectral muito próxima da sua faixa de emissão (MIMS, 1992) (Figura 16).

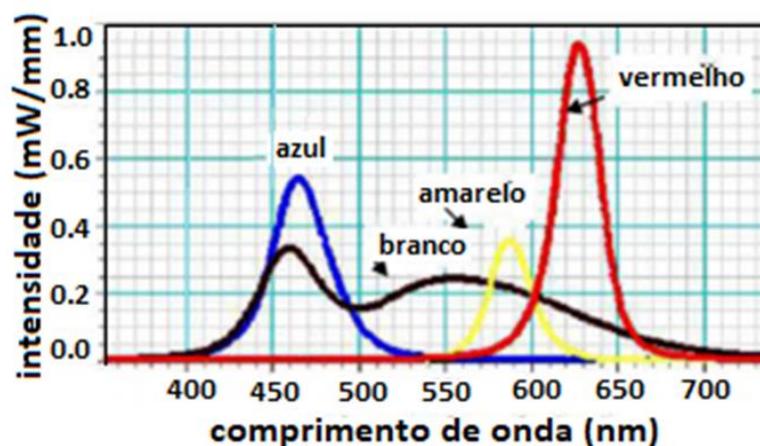
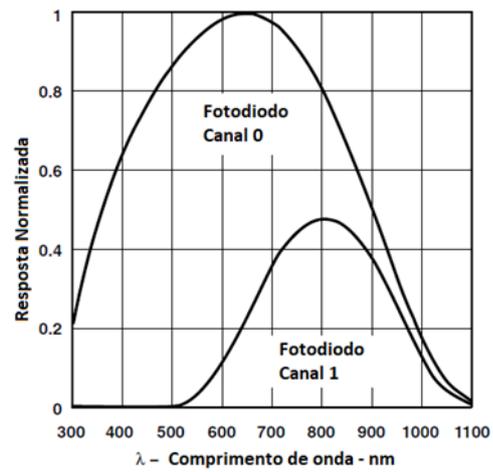


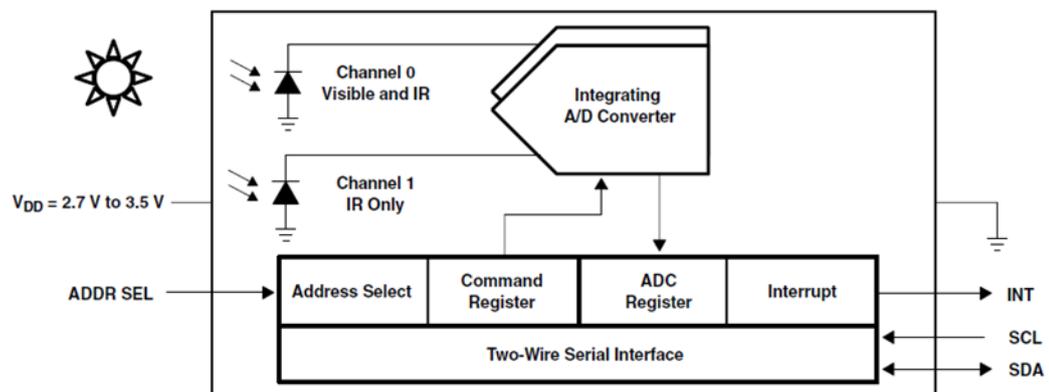
Figura 16. Intensidade de emissão por LEDs em função do comprimento de onda. (KRAFTMAKHER, Y. 2011)

## 2.9. Sensor de luz TSL 2561

O TSL2561 é um sensor de luz digital composto por dois fotodiodos sendo um fotodiodo de banda larga (300 nm a 1100 nm) e um fotodiodo de resposta infravermelha (500nm a 1100nm) (Figura 17). Esses fotodiodos estão acoplados em um único circuito integrado contendo um conversor analógico digital de resolução de 16 bits por banda, fazendo com que as leituras sejam feitas simultaneamente e transferidas para os registros de dados canal 0 e canal 1 que representa a radiância medida em cada canal com comunicação I2C (Figura 18) (TAOS, 2009).



**Figura 17.** Curva característica do sensor TSL 2561 (TAOS).



**Figura 18.** Diagrama em blocos do sensor TSL 2561 (TAOS).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. CIRCUITO DE TESTES DE SELETIVIDADE DOS LEDs

Com a finalidade de analisar se os elementos sensores inicialmente escolhidos poderiam ser utilizados no desenvolvimento do projeto e avaliar as características comportamentais dos mesmos, foi desenvolvido um sistema microcontrolado (Figura 19) que permitiu obter e armazenar as leituras obtidas com os sensores.

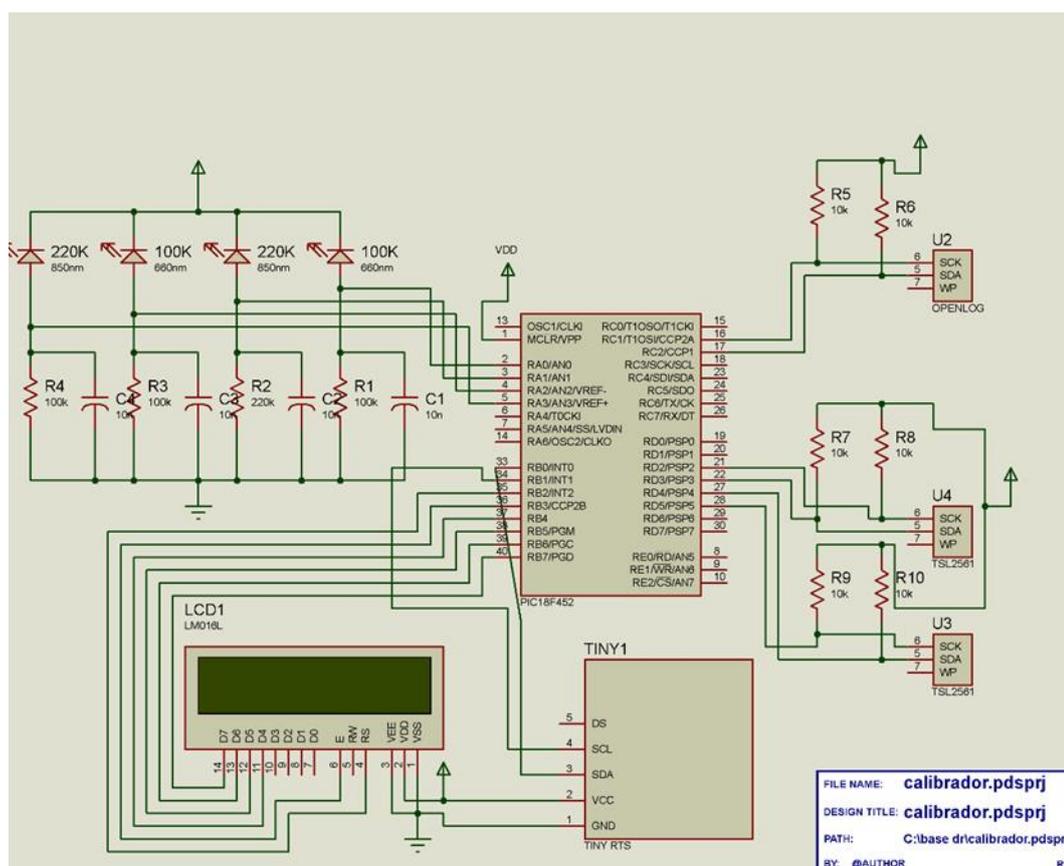


Figura 19. Diagrama elétrico do circuito para testes fixos (Autor).

#### 3.2. DESENVOLVIMENTO DO DATALOGGER DO MEDIDOR PORTÁTIL DE NDVI

Todo o circuito do medidor embarcado gira em torno do microcontrolador (18f452, Microchip Technology Inc) que possui 32 Kb de memória, conversor A/D (analógico/digital) de 10 bits, 33 pinos de entrada e ou saída disponíveis, com consumo de 15 mA com oscilador de 20MHz.

O armazenamento dos dados em memória microSD foi elaborado com um módulo embarcado Open logger Sparkfun, um módulo embarcado gravador de dados em memória SD programável com comandos AT com entrada e saída padrão RS 232 com firmware de sistema de arquivos FAT 32 embutido, facilitando a

abertura de seus arquivos por qualquer sistema operacional incluindo sistema operacional Android, flexibilizando a coleta de dados.

Os controles temporais do circuito são executados por um módulo embarcado de tempo real RTC Tiny por apresentar alta precisão e durabilidade da bateria interna, além deste foi adicionado uma tela LCD de 16 caracteres x 4 linhas como interface ao usuário, na Figura 19 é apresentado o esquema elétrico do sistema desenvolvido.

### **3.3. SENSORES ANALÓGICO E DIGITAL**

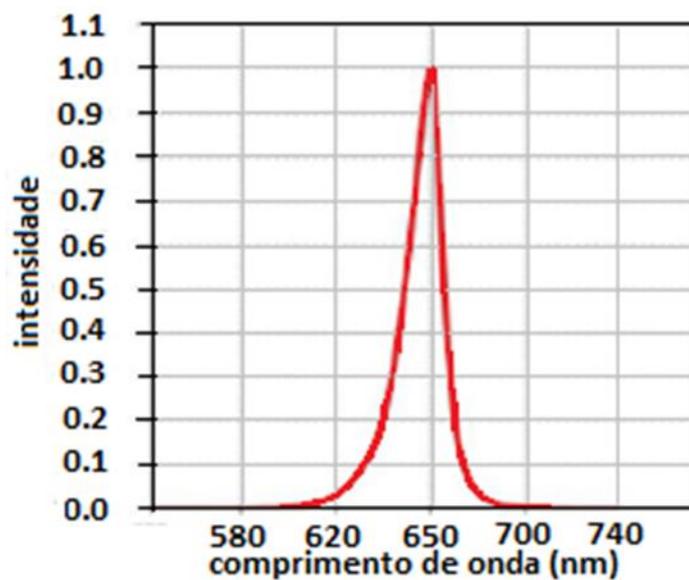
O sensor para medição da refletância do vermelho e do infravermelho foi desenvolvido com LEDs de 660 nm e 850 nm, e conectados a quatro canais analógicos de resolução de 10 bits do datalogger, sendo dois canais para os LEDs de 660 nm e 850 nm que recebem a radiação incidente e dois canais que recebem a radiação refletida. Paralelo aos LEDs, também foram utilizados dois módulos embarcados TSL 2561, que possui saída digital, para medição da refletância da faixa do vermelho e do infravermelho.

#### **3.3.1. LED 660nm**

LED do fabricante Sunled (Figura 20) com potência de 3 W, e corrente de 700 mA, tensão de 2,4 V, ângulo de feixe de 120° e tensão reversa máxima de 5 V. Na Figura 21 é apresentado o a curva espectral do LED de 660nm.



**Figura 20.** LED 660 nm, 3 Watts (Autor).



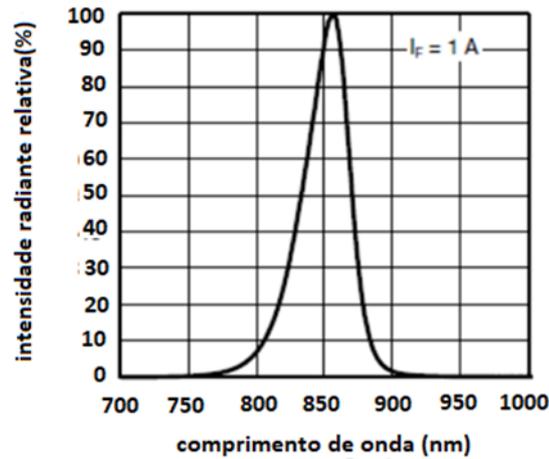
**Figura 21.** Curva de resposta do LED 660 nm 3 watts (Autor).

### 3.3.2. LED 850nm

LED do fabricante Sunled (Figura 22) com potência de 3 W, e corrente de 700 mA, tensão de 2,4 V, ângulo de feixe de 120° e tensão reversa máxima de 5 V. Na Figura 23 é apresentado o a curva espectral do LED de 660nm.



**Figura 22.** LED 850 nm, 3 Watts (Autor).



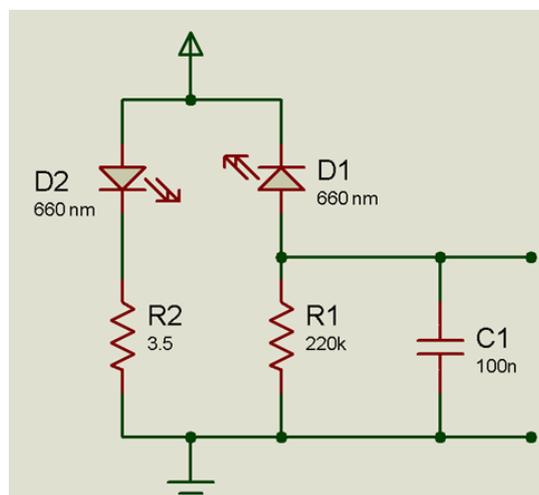
**Figura 23.** Curva de resposta do LED 850 nm 3 watts. (Autor).

### 3.4. FASE DE TESTES

Este estudo foi desenvolvido em três fases. A primeira com os testes de seletividade de comprimentos de onda dos LEDs (teste de bancada), tensão de saída dos sensores, colimador e difusor de luz. A segunda fase para testar a resposta dos sensores de LED em condições de campo, simultaneamente foram usados outro conjunto de sensores digitais TSL 2561 em paralelo para redundância de dados (todos para cima e depois em configuração de uso). A terceira com o desenvolvimento do sistema embarcado e medições de NDVI.

#### 3.4.1. Teste de Seletividade dos LEDs (teste de bancada)

Para o teste de seletividade dos LEDs foi usado o circuito da Figura 24, em que o LED D2 foi utilizado como emissor e D1 na configuração fotocondutor e saída em C1. O teste foi feito de maneira individual nos comprimentos de onda de 660 nm e 850 nm.



**Figura 24.** Circuito elétrico para teste de seletividade do comprimento de onda (Autor).

**Tabela 1.** Resistores utilizadas para o teste de seletividade dos LEDs.

Emissor	Fotocondutor	R1	R2
660 nm	660 nm	330k Ohm	3,5 Ohm
850 nm	660 nm	330k Ohm	2,5 Ohm
660 nm	850 nm	220k Ohm	3,5 Ohm
850 nm	850 nm	220k Ohm	2,5 Ohm

Os resistores usados nos LEDs de 660 nm e 850 nm (Tabela 1) foram determinadas através da medição da corrente máxima gerada por cada LED em pleno sol utilizando um miliamperímetro MINIPA ET-1002, ligado em serie ao LED polarizado de modo reverso a uma diferença de potencial de 5 V (Figura 25), e aplicada a 1ª lei de Ohm (Equação 2).

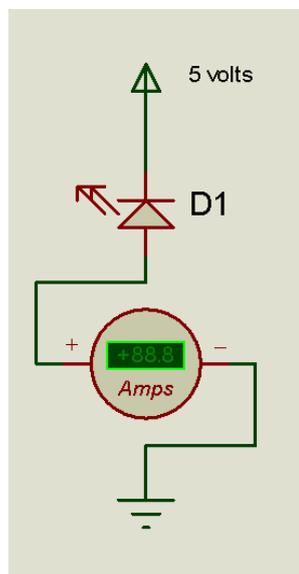
$$R = \frac{V}{I} \quad (2)$$

em que  $V = 0.7 \text{ V}$  e  $I$  a corrente máxima do LED em pleno sol, sendo  $2,1 \mu\text{A}$  para o LED 660 nm e  $3,1 \mu\text{A}$  com o LED de 850nm.

A queda de tensão em R1 de 0,7 V foi escolhida por ser a tensão da barreira de potencial do silício e assim compensar a eficiência de absorção da junção dos LEDs (Quadro 1), uma vez que a corrente gerada em uma junção polarizada no sentido reverso é calculada pela Equação (3) (LÉRIAS, 2008).

$$I = \phi q \eta \quad (3)$$

em que  $\phi$  é o fluxo de fótons incidentes,  $q$  é a carga do elétron e  $\eta$  é a eficiência quântica de conversão da radiação em elétrons livres.

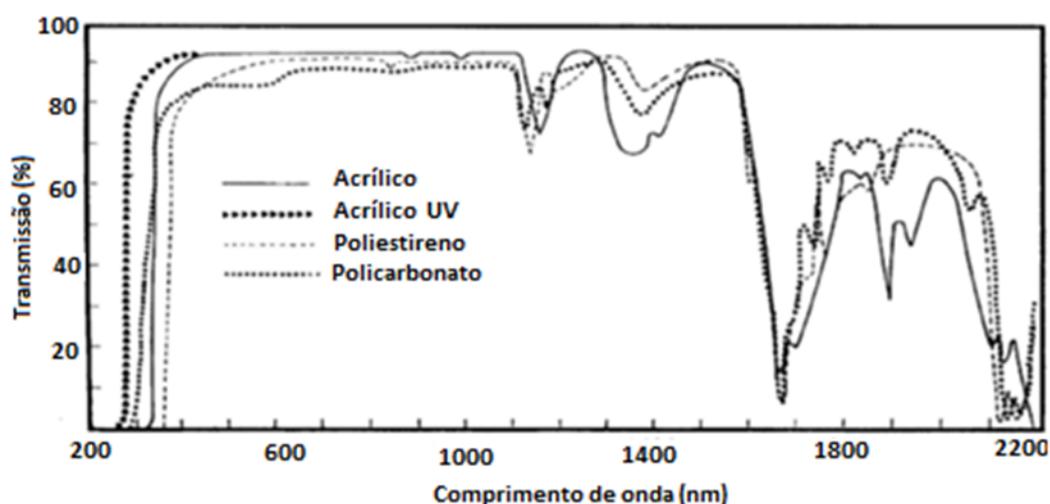
**Figura 25.** Determinação da corrente máxima a pleno sol (Autor).

Os testes de seletividade de bandas foram efetuados com os LEDs separados por uma distância de 400 mm sem uso de colimador ótico, tendo um ângulo focal de 120°, e com um colimador ótico que mudou o ângulo focal para 30°.

Os LEDs com os respectivos colimadores foram inseridos em tubos pintados de preto fosco usando acrílico leitoso como difusor de luz (Figura 26), o difusor de acrílico foi escolhido devido sua característica ótica plana em todo espectro visível e infravermelho próximo como mostrado na Figura 27.



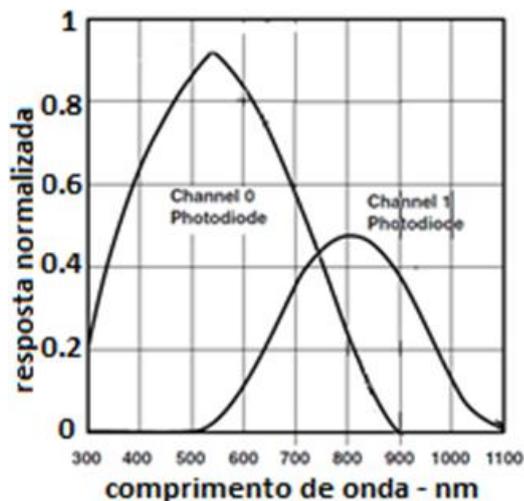
**Figura 26.** Montagem dos LEDs, colimadores e difusor. (Autor)



**Figura 27.** Curva de transmitância do acrílico, poliestireno e policarbonato. (Weber (2003))

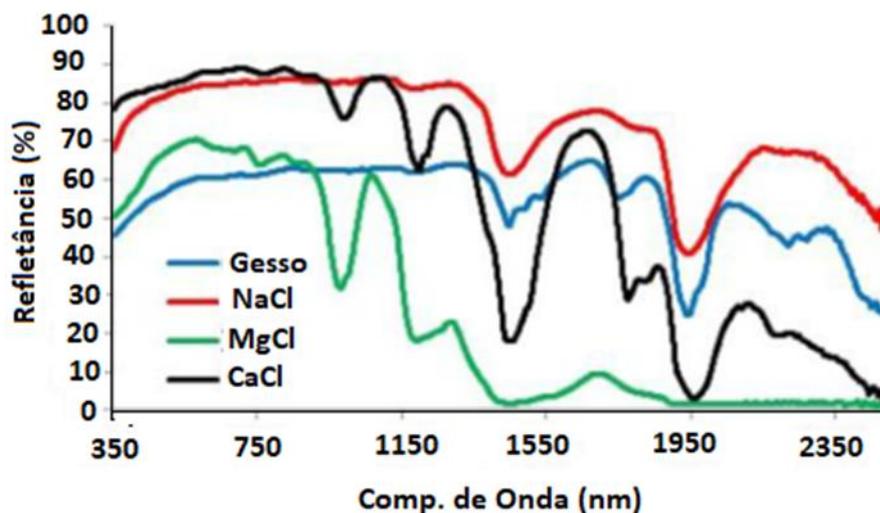
### 3.4.2. Correção de largura de banda e ganho de resposta do sensor TSL 2561

A resposta espectral do canal 0 engloba o visível e o infravermelho próximo, com ganho máximo entre 600 e 700 nm, o canal 1 tem o pico de ganho entre 750 nm e 850 nm como mostrado na Figura 28. A resposta ao canal 0 foi derivada em relação ao canal 1 com a finalidade de distinguir a resposta entre os canais, com pico de resposta do canal 0 para aproximadamente 530 nm dentro do espectro visível, e o canal 1 com pico em 800 nm dentro da faixa do infravermelho próximo.



**Figura 28.** Resposta espectral do TSL 2561 corrigida (Autor).

Para a determinação da refletância mínima foi usado um recipiente com 40 cm de profundidade e 40 cm de diâmetro com água limpa por sua grande absorção de grande parte do espectro visível e do infra vermelho, para a refletância máxima uma placa coberta com uma camada de 5mm formando uma superfície Lambertiana de NaCl (Figura 29), com refletividade estável no espectro visível e infravermelho (CLENIO et al, 2013).



**Figura 29.** Refletância espectral para Gesso, NaCl, MgCl e CaCl. (CLENIO et al, 2013).

### 3.4.3. Testes com Sensores e Calibração em Plataforma fixa

Os testes em plataforma fixa foram realizados em um mastro de altura fixa de 0,40 m dos alvos para a calibração e determinação do índice de refletividade dos alvos. Nesta fase, foi desenvolvido um Datalogger (Figura 30) para coleta de dados dos comprimentos de onda obtidos dos LEDs e dos sensores digitais TSL 2561, com gravação em memória micro SD, mostrador em LCD do status, leitura e gravação como apresentado no diagrama elétrico na Figura 19.



**Figura 30.** Datalogger desenvolvido para os testes fixos (Autor).

Os LEDs e o sensores foram submetidos às mesmas condições temporais a fim de obter valores de incidência direta, isso é, os sensores posicionados com as janelas óticas para cima (Figura 31), a fim de avaliar se os sensores do mesmo comprimento de onda apresentavam o mesmo comportamento ao longo do dia.



**Figura 31.** Calibração dos sensores LEDs e TSL 2561 (Autor).

Em um segundo momento, os sensores que medem a radiação solar incidente e a refletida de cada par de comprimento de onda foram posicionados contrapostos a  $135^\circ$  (Figura 32) sobre uma superfície de água, em uma superfície lambertiana (NaCl), e sobre o gramado. Isso foi realizado para analisar a refletância

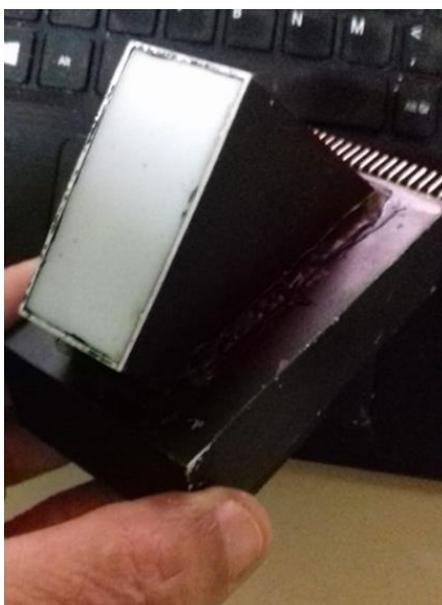
dos comprimentos de onda dessas superfícies e avaliar se elas eram realmente capazes de obter o NDVI.



**Figura 32** Disposição dos sensores para tomada de medidas de NDVI (Autor).

#### **3.4.4. Teste de leitura do NDVI em Diferentes Superfícies com protótipo**

Ao término dos testes estáticos foi construído o protótipo funcional do sistema embarcado portátil com os sensores montados em cabeçotes independentes e intercambiáveis conforme Figura 33. Isso foi necessário para possibilitar a troca entre os elementos sensores LEDs e TSL 2561.



**Figura 33.** Cabeçote de leitura intercambiável (Autor).

Os alvos testados para medidas de NDVI foram uma superfície gramada sem restrição hídrica, uma superfície de palha e uma superfície lambertiana (NaCl). A sequência de medidas usadas foram: Quatro (4) segundos no alvo NaCl, quatro segundos em grama, e novamente quatro segundos em NaCl, com três (3) repetições para grama verde e duas para palha, após estas medidas foi efetuada a troca do sensor de LEDs pelo sensor TSL2561 e nova sequência de dados era adquirida. Somente os dados obtidos nas sequências em que houvesse as mesmas condições de luminosidade e vento foram aproveitados, sendo o restante descartado.

A reflectância da banda do vermelho e do infravermelho medidas com os LEDs e TSL2561 foram corrigidas utilizando a superfície de NaCl, que tende a ser uma superfície Lambertiana, assumindo o valor de 0,8 nas duas bandas. Para tanto, foram realizadas 56 amostras e determinado um coeficiente de conversão a partir da razão entre a reflectância da superfície de sal (0,8) e a média das amostras das duas reflectâncias para cada um dos sensores.

### 3.5. CÁLCULO DO NDVI

Os testes estáticos foram feitos com os sensores LEDs e TSL2561 fazendo leituras simultâneas a cada minuto e gravando a média a cada 5 minutos, usando como alvos NaCl, palha e grama verde, aplicando a Equação (4) no cálculo do NDVI utilizando os LEDs como sensor.

$$NDVI = [850corr - 660corr]/[850corr + 660corr] \quad (4)$$

onde *850corr* infravermelho corrigido pela reflectância do NaCl e *660corr* é o vermelho corrigido pela reflectância do NaCl.

Para o cálculo do NDVI utilizando o sensor TSL 2561 foi utilizado a Equação (5)

$$NDVI = \frac{\left[ \frac{(irreflcorr)}{(irinccorr)} - \frac{(visreflcorr - irreflcorr)}{(visinccorr - irinccorr)} \right]}{\left[ \frac{(irreflcorr)}{(irinccorr)} + \frac{(visreflcorr - irreflcorr)}{(visinccorr - irinccorr)} \right]} \quad (5)$$

Onde *irreflcorr* são os valores de infravermelho refletido, *irinccorr* são os valores de infravermelho incidente, *visreflcorr* são os valores para o visível refletido e *visinccorr* que são os valores para o visível incidente.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. TESTE DE SELETIVIDADE DOS LEDs

Os LEDs se mostraram seletivos nos comprimentos de onda de 660 nm e 850 nm, e os LEDs de 660 nm não apresentaram leitura à emissão do LED de 850 nm, e vice-versa (Tabela 2). Durante este teste, também se identificou que o ângulo de abertura focal e o uso de um colimador influenciou na sensibilidade. Os LEDs separados por uma distância de 400 mm sem uso de colimador ótico, e com um ângulo focal de 120°, apresentou baixa sensibilidade na saída, com tensão entre 0,05 V e 0,06 V. Entretanto, tiveram maior sensibilidade com colimador de específico e ângulo focal de 30° (Tabela 2).

**Tabela 2.** Teste de seletividade de banda e sensibilidade dos LEDs.

Emissor	Fotocondutor	R1	R2	Tensão – 120°	Tensão – 30°
660 nm	660 nm	330k Ohm	3,5 Ohm	0,05 V	0,50 V
850 nm	660 nm	330k Ohm	2,5 Ohm	0,00 V	0,00 V
660 nm	850 nm	220k Ohm	3,5 Ohm	0,00 V	0,00 V
850 nm	850 nm	220k Ohm	2,5 Ohm	0,06 V	0,50 V

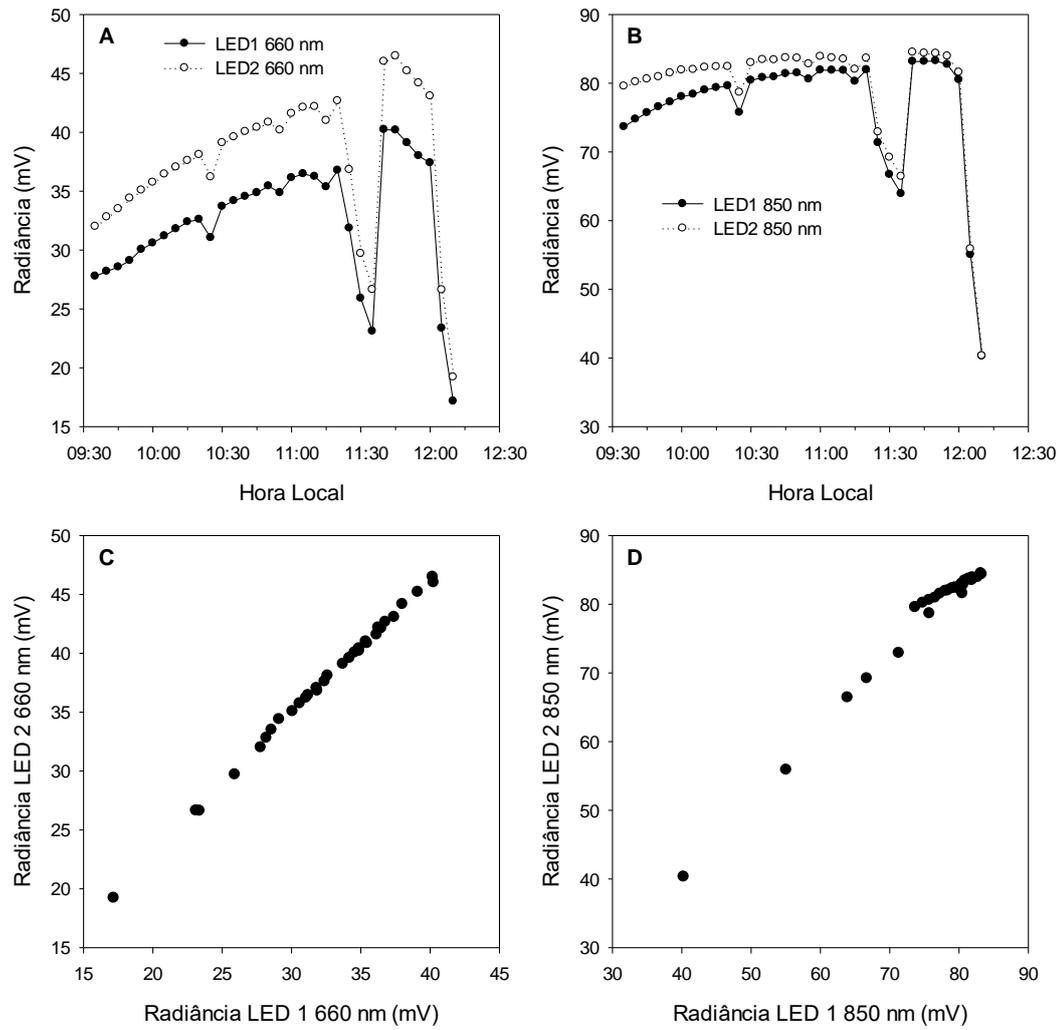
O teste de seletividade do TSL 2561 mostra que, considerando o comprimento de onda de 660 nm, o infravermelho representa 21% do valor lido, e considerando o comprimento de onda de 850 nm, a leitura do visível representa 42% do valor medido (Tabela 3).

**Tabela 3.** Teste de seletividade do TSL 2561.

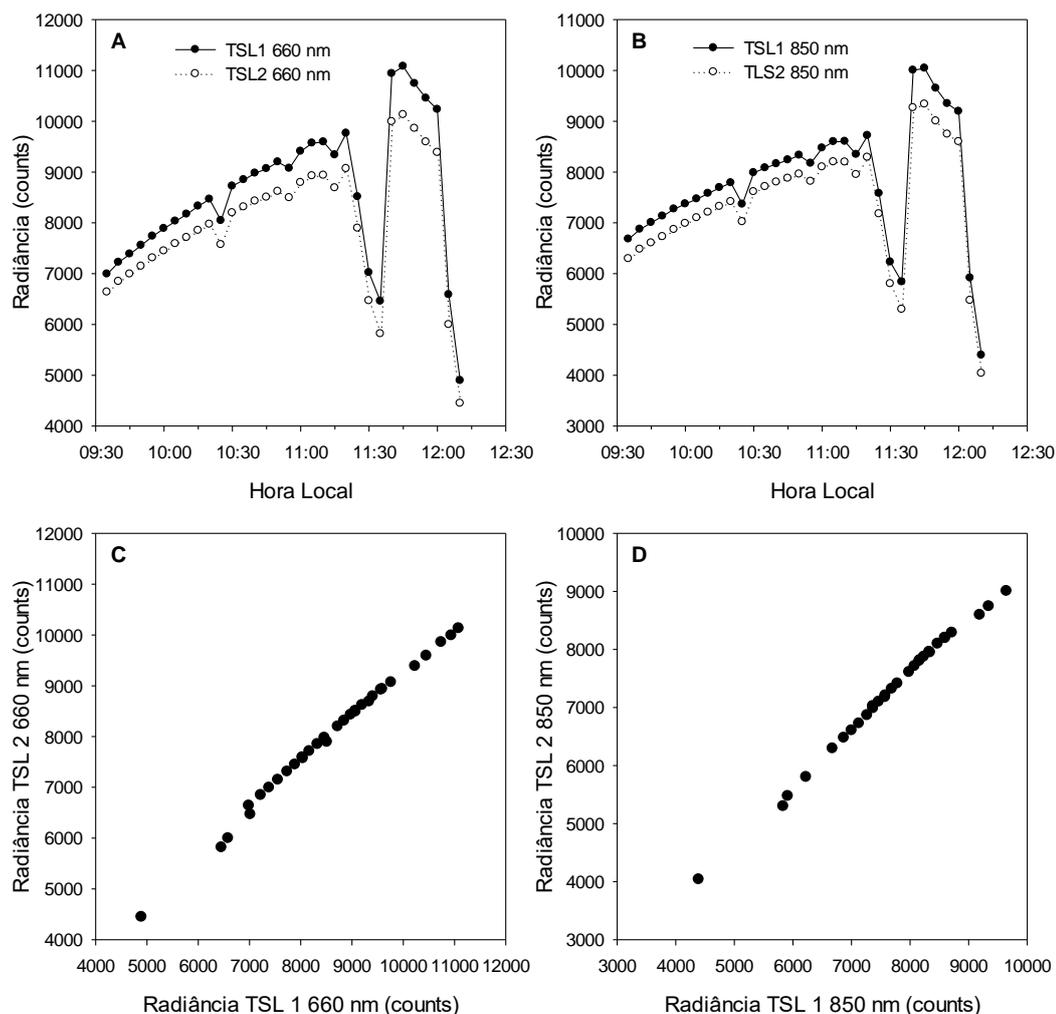
Emissor	Visível	Infravermelho	%
660nm	800	168	21%
850nm	800	1887	42%

### 4.2. TESTE INICIAIS DOS SENSORES NA PLATAFORMA FIXA

Os testes iniciais de campo mostraram que tanto os LEDs, quanto os TSL 2561 apresentaram alta linearidade e correlação entre si, quando expostos à radiação solar direta com os sensores voltados para cima. (Figuras 34 e 35).



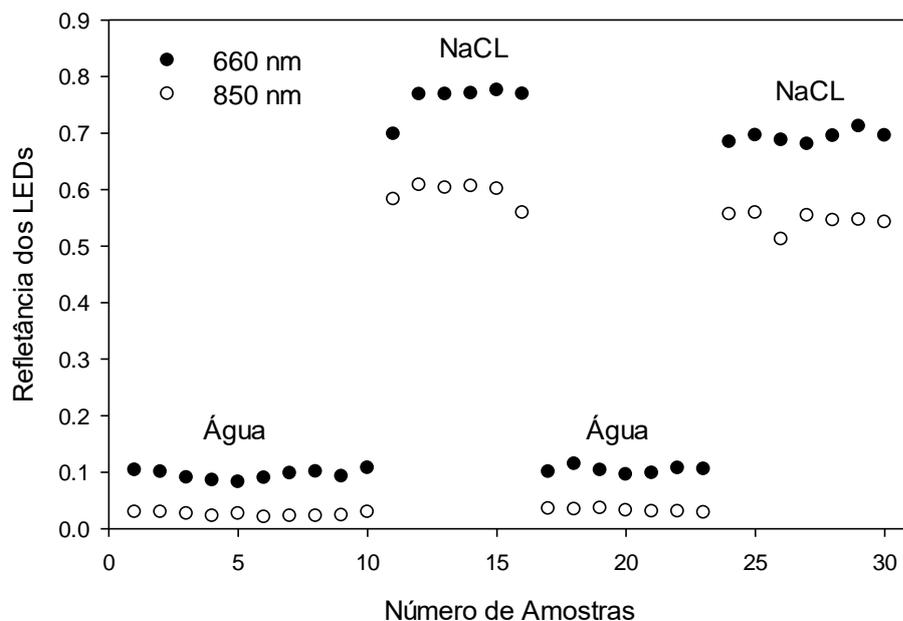
**Figura 34.** Radiância medida pelos LEDs na banda de 660 nm (A) e 850 nm (B) e relação entre os dois LEDs de 660 nm (C) e de 850 nm (D).



**Figura 35.** Radiância medida pelos TSL 2561 na banda de 660 nm (A) e 850 nm (B) e relação entre os dois TSL 2561 de 660 nm (C) e de 850 nm (D).

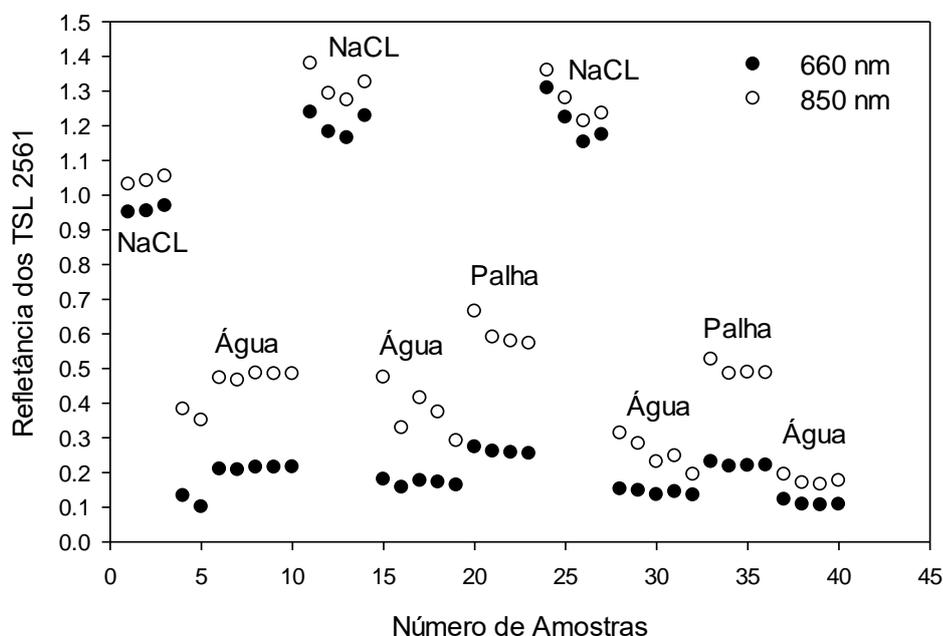
### 4.3. TESTE DA RESPOSTA DOS SENSORES

As reflectâncias do NaCl de 660 nm e 850 nm medidas pelos LEDs variaram entre 70% e 80% (Figura 36). No entanto, as refletâncias da água obtida pelos LEDs foram ligeiramente superiores às da literatura, entre 7% e 9%. Provavelmente essa diferença se deve a vários fatores, como o volume de água, refletância de fundo e condições de cobertura de nuvens (PEREIRA et al, 2005).



**Figura 36.** Refletância da superfície lambertiana (NaCl) e da água medida pelos LEDs de 660 nm e 850 nm.

As reflectâncias do NaCl de 660 nm e 850 nm medidas pelos TSL 2561 variaram entre 1,0 e 1,4 (Figura 37). Esses valores indicam a limitação do TSL 2561 por não separar totalmente a banda do 660 nm e do 850 nm. Outra limitação do TSL 2561 foi que a reflectância da água na banda de 850 nm foi maior que na banda 660 nm, quando é esperado o contrário. Isso indica que, para se utilizar o TSL 2561 como sensor, deve-se calibrar a reflectância.

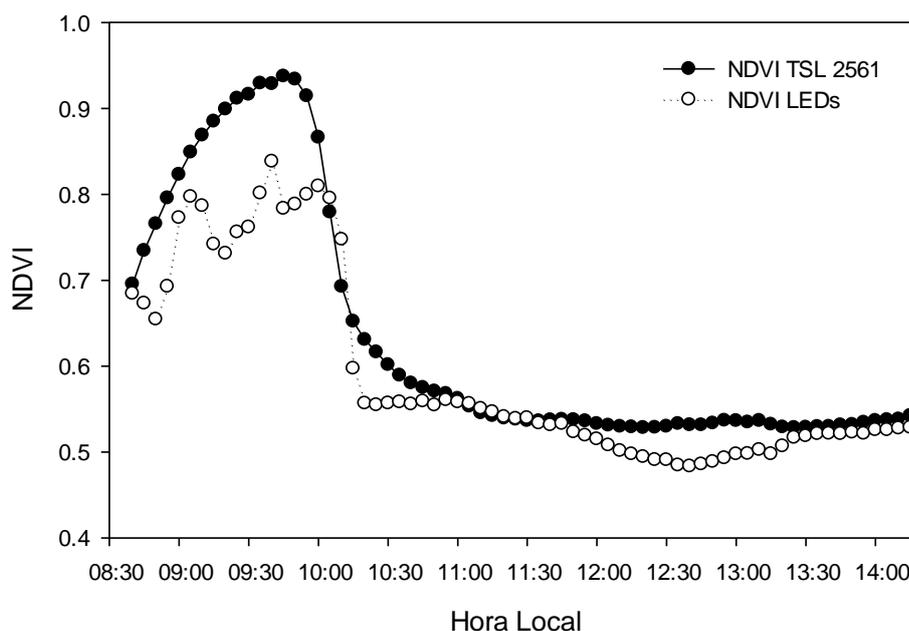


**Figura 37.** Refletância da superfície lambertiana (NaCl), palha e da água medida pelos TSL 2561 de 660 nm e 850 nm.

Cada uma das amostras, tanto utilizando LED como TSL 2561, foram realizadas em tempos diferentes. Ao visualizar as Figuras 36 e 37, observa-se que as amostras das mesmas superfícies variaram ao longo do tempo. Para avaliar essa

influência, o mastro fixo foi instalado sobre uma superfície de grama verde e os sensores LED e TSL 2561 amostraram ao mesmo tempo. Com essas medidas, o NDVI da superfície gramada foi calculado (Figura 38).

Pela Figura 38, observa-se que o ângulo de incidência dos raios solares influenciou nos valores do NDVI. Essa influência já foi documentada por Lobo (2008) que elenca que se deve sempre evitar sombreamento e ângulos zenital maiores de  $45^\circ$  e azimutal de  $90^\circ$  em relação ao sol para minimizar as contribuições de reflexão especular.



**Figura 38.** NDVI obtido pelos TSL 2561 e LEDs sobre uma superfície de grama verde.

#### 4.4. MEDIDOR PORTÁTIL DE NDVI

Após ter realizado os testes dos sensores de LEDs e TSL 2561, foi desenvolvido a sonda (Figura 49) e o medidor portátil de NDVI (Figura 40). Este equipamento foi pensado para ser multifuncional, sendo apenas o bloco sensor intercambiado por outros blocos de sensores. Sendo assim, possível realizar outras medidas com para outros comprimentos de onda, possibilitado a obtenção de outros índices.



**Figura 39.** Sonda intercambiável (Autor).



**Figura 40.** Medidor portátil de NDVI (Autor).

O medidor portátil de NDVI foi desenvolvido para ter comunicação Bluetooth, GPS, gravador microSD, tela LCD 16 caracteres x 2 linhas e botões para seleção de leitura, localização GPS e gravação. O algoritmo de leitura faz 10 leituras consecutivas. Caso ocorra variações de 30% entre cada uma dessas 10 leituras, uma nova leitura é iniciada por indicar possível efeito especular ou movimentação brusca do sensor que inutiliza os dados.

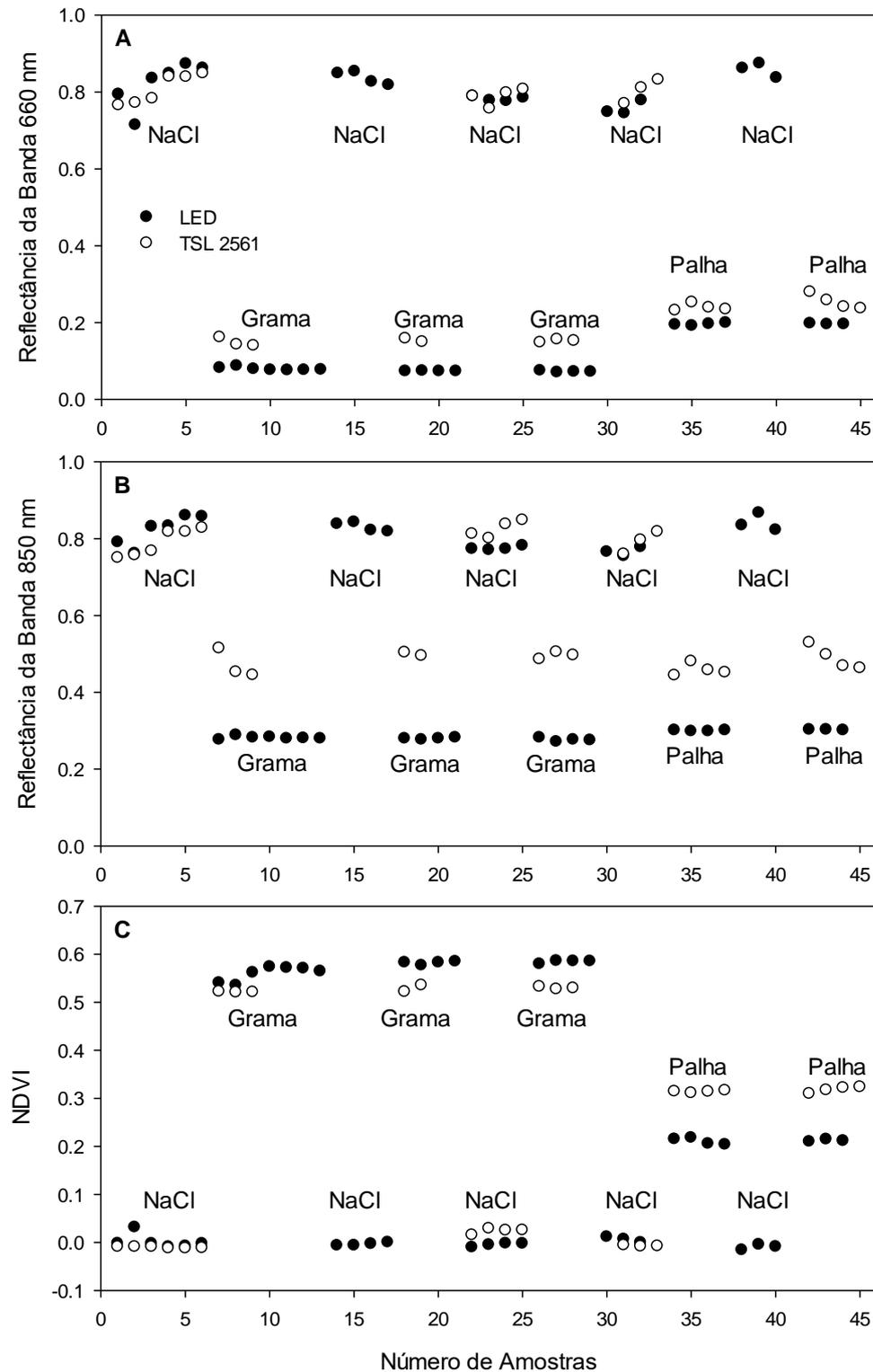
Terminada a leitura é possível gravar os dados georreferenciados automaticamente, com transmissão dos dados via Bluetooth simultaneamente à gravação no microSD.

#### **4.5. MEDIÇÃO DA REFLETÂNCIA DAS BANDAS DE 660 NM E 850 NM E CÁLCULO DO NDVI PELO MEDIDOR PORTÁTIL**

A reflectância e o NDVI utilizando os sensores LED e TSL 2561 com o medidor portátil foram obtidos na seguinte ordem: NaCl, grama, NaCl, grama, NaCl, grama, NaCl, palha, NaCl, palha. Antes de iniciar as leituras, foram obtidas 10 amostras com cada sensor da reflectância da superfície lambertiana (NaCl) para calibração das medidas. Usou-se o valor de 0,8 de reflectância da banda de 660 nm e da banda de 850 nm na superfície de NaCl.

Tanto a reflectância da banda de 660 nm, quanto a de 850 nm foram mais estáveis ao utilizar os LEDs como sensores que as medidas com o TSL 2561 variaram na mesma superfície (Figura 41). O NDVI calculado com as reflectâncias obtidas com os dois tipos de sensores apresentaram menor variação que as reflectâncias.

Por incorporar parte da banda visível e infravermelho nos canais do sensor TSL 2561, o NDVI da grama e da palha foram diferentes significativamente (Tabela 4). No entanto, mostram-se plenamente capazes de reconhecer diferenças entre espectro visível e infravermelho.



**Figura 41.** Reflectância das bandas 660 nm e 850 nm e NDVI obtido pelos sensores LED e TSL 2561 sobre uma superfície de NaCl, grama verde e palha.

O sensor TSL 2561 por incorporar parte da banda visível e infravermelho em seus canais majoram os valores de NDVI calculados em relação ao sensor LED que responde corretamente aos valores encontrados na literatura.

A determinação do NDVI, por serem seletivos nas bandas espectrais analisadas, permitirão o uso de colimadores de ângulo específico de 30 graus facilitando a confecção dos difusores, e permitirão a leitura em 45 graus em relação a superfície analisada, evitando a leitura de áreas sombreadas pelo próprio sensor em horários de pequeno ângulo zenital.

Na Tabela 4 são apresentados resultados obtidos para o NDVI para as superfícies analisadas em relação a valores encontrados por outros autores. As maiores discrepâncias encontradas entre os sensores foram com a placa de NaCl e a Água porém ainda se encontra dentro da faixa citada na literatura, para os alvos Palha e Grama Verde ambos apresentaram medidas idênticas.

**Tabela 4.** Valores das reflectâncias das bandas de 660 nm e 850 nm e NDVI utilizando LEDs e TSL 2561 como sensores.

Sensores	Bandas	Grama	Palha	NaCl
TSL 2561	660 nm	0.15±0.00	0.25±0.01	0.80±0.02
	850 nm	0.49±0.02	0.48±0.02	0.80±0.02
	NDVI	0.53±0.00	0.32±0.00	0.00±0.01
LED	660 nm	0.08±0.00	0.20±0.00	0.80±0.03
	850 nm	0.28±0.00	0.30±0.00	0.80±0.02
	NDVI	0.57±0.01	0.21±0.00	0.00±0.01
NDVI (Literatura)	---	0,68 a 0,75 (Molin et al., 2007)	de 0,1 a 0,25 (Chaves et al., 2013)	de -0,51 a 0 (Araújo et al., 2018)

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O sistema embarcado desenvolvido cumpriu o objetivo de coleta de dados de reflectância e determinação do NDVI. A facilidade da coleta e da troca entre os sensores LED e TSL 2561 permitiu a leitura das reflectâncias da banda de 660 e 850 nm e o cálculo do NDVI de forma rápida e com valores condizentes com a literatura.

### **5.1. CONTRIBUIÇÕES**

Estas foram as principais contribuições geradas no desenvolvimento deste trabalho:

- A análise de diferentes sensores na obtenção de medidas de reflectância e cálculo no NDVI;
- A disponibilização de um equipamento portátil para obtenção do NDVI;
- Replicação do trabalho desenvolvido;
- A redução de custos na instrumentação;
- A disponibilização de um hardware que favoreça pesquisas futuras de índices baseados em outros comprimentos de onda.

### **5.2. TRABALHOS FUTUROS**

Tendo em vista as contribuições alcançadas a tecnologia desenvolvida possibilita o desenvolvimento de novos trabalhos:

A construção de sondas para obtenção de outros índices de cobertura;

A construção de um banco de dados de NDVI para diferentes coberturas e suas condições de contorno.

## 6. REFERÊNCIAS

ABREU; KELLY SILVA. **CONSTRUÇÃO DE UM RADIÔMETRO PARA A CARACTERIZAÇÃO DE LEDs**. Dissertação (Física)- Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia –Salvador BA. 2014.

ALVES, MAURICIO MOREIRA; **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação** 3 edição Atualizada e Ampliada 1 reimpressão Editora ·UFV Universidade Federal de Viçosa 2007

ARAÚJO, ANA BEATRIZ ALVES DE. FREITAS, ISAACALVES DA SILVA. JÚNIOR, ANTÔNIO ALDÍSIOSCARLOS. SILVA, SUEDÊMIO DE LIMA E. SILVA, PAULO CESAR MOURA DA. **ANÁLISE DOS ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NDVI E SAVI NO MUNICÍPIO DE MOSSORÓ UTILIZANDO IMAGENS LANDSAT 8. III CONGRESSO INTERNACIONAL DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS**. Toledo PR 2018.

BOUZIDI, SONIA. LAHOUCHE, FABIEN. HERLIN, ISABELLE. **Land use classification at meso-scale using remotely sensed data** - International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B7. Amsterdam 2000.

BRITO, MARIANA MADRUGA DE; FARIAS, ANDRÉ RODRIGO. **Espectroradiometria foliar de árvores frutíferas e o efeito da umidade sobre a resposta espectral das folhas**. Conference: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto: Foz do Iguaçu 2013

CABRAL, J. B. P.; FERNANDES, L. A.; SCOPEL, I.; LOPES, R. M.; SOUSA, R. R.; FREITAS, V. V. MORAES, R. S.; ALVES, S. S., **CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL DO RESERVATÓRIO DE CACHOEIRA DOURADA – GO/MG. X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA**. 2003

CARVALHO JÚNIOR, O. A. D., Guimarães, R. F., Martins, É. D. S., Carvalho, A. P. F. D., & Gomes, R. A. T. **Aplicação do método de identificação espectral para imagens do sensor ASTER em ambiente de cerrado**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 23, n. 2, p. 159-172, 2005. ABREU; KELLY SILVA. **CONSTRUÇÃO DE UM RADIÔMETRO PARA A CARACTERIZAÇÃO DE LEDs**. Dissertação (Física)- Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia –Salvador BA. 2014

CHAVES, MICHEL EUSTÁQUIO DANTAS. MATAVELI, GUILHERME AUGUSTO VEROLA. GUERRERO, JOÃO VITOR ROQUE. JUSTINO, RODRIGO CESÁRIO. **Análise comparativa do NDVI estimado a partir de valores de níveis digitais originais e de reflectâncias aparente e de superfície** - Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, INPE 2013

CLARO, M. S. **Determinação da corrente de escuro em fotodetectores de radiação infravermelha baseados em poços quânticos (QWIPs)**. Tese (instituto de Física). Universidade de São Paulo. 2013.

CLENIO, L. J. M.; SANTOS, A. T.; OLIVEIRA, A. L.; MAIA, E. A.; RAYRA, A. H. S. **Características espectrais de solos aluviais submetidos à salinização**.

Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE

**COMPONENTES LIGNINA, CELULOSE E HEMICELULOSE. Dissertação-(engenharia agrícola) programa de pós graduação em engenharia agrícola da universidade estadual de Campinas . Campinas SP-2012**

DALMOLIN, RICARDO SIMÃO DINIZ; GONÇALVES, CRISTIANO NUNES; KLAMT, EGON; DICK, DEBORAH PINHEIRO. **Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral.** Cienc. Rural, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 481-489, Apr. 2005.

DANILO, EVERTON BORTOLY; MEROTTO, ALDO JR.; BREDEMEIER, CHRISTIAN; CLAYTON, IVES GOMES DOS REIS GOULART; LUIZ, ANDERSON NUNES; KUPAS, VALMIR. **DETERMINAÇÃO DO EFEITO DA COMPETIÇÃO DE PLANTAS DANINHAS COM MILHO ATRAVÉS DE FOTOGRAFIA DIGITAL E ÍNDICES DE REFLECTÂNCIA.** XXII SIC Salão de Iniciação Científica, UFRGS, outubro de 2010

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto.** 3ª Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. Disponível em:  
<[http://books.google.com.br/books/about/Inicia%C3%A7%C3%A3o\\_em\\_Sensoriamento\\_Remoto.html?hl=pt-BR&id=18GkH5X81XcC](http://books.google.com.br/books/about/Inicia%C3%A7%C3%A3o_em_Sensoriamento_Remoto.html?hl=pt-BR&id=18GkH5X81XcC)>. Acesso em: 22 nov. 2019.

GUERREIRO, JÉSSICA SANTOS RAMALHO; GILBERT, DENIS FRANCIS DAVID; ÉRICO, ANTÔNIO B. A. SOARES; LEMAIRE, THIERRY J.; **RADIÔMETRO DE LEDs.** III Congresso Brasileiro de Energia Solar - Belém, setembro de 2010

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos naturais.** São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.

JUNIO, FÁBIO PEREIRA VAILANT; **DESENVOLVIMENTO DE UM INSTRUMENTO PORTÁTIL PARA OBTENÇÃO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI)** TCC bacharelado em Geografia Universidade Federal de Goiás 2017

KHAN, NASIR M. RASTOSKUEV, VICTOR V. SHALINA, ELENA V. SATO, YOHEI **Mapping Salt-affected Soils Using Remote Sensing Indicators- A Simple Approach With the Use of GIS** Proceedings of the 22nd Asian Conference on Remote Sensing, Sin-gapore.2001

LÉRIAS, SÉRGIO DOS SANTOS ORTEGA; **SELECÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE SENSORES ÓPTICOS PARA DETECÇÃO EM BIOSSENSORES** 2008 Dissertação (Engenharia Física). DEPARTAMENTO DE FÍSICA. UNIVERSIDADE DE LISBOA FACULDADE DE CIÊNCIAS. 2008

LOBO, FELIPE DE LUCIA. **Biblioteca espectral: determinação de espectros de referência para a classificação de tipos de água das áreas alagáveis da Amazônia.**2008.132. Dissertação (Sensoriamento Remoto) - Programa de Pós-Graduação do INPE em Sensoriamento Remoto SP 2008.

MAIO, A.; RUDOLFF, B. F. T.; MORAES, E. C.; PEREIRA, G.; MOREIRA, M. A.; SAUSEN, T. M.; FLORENZANO, T. G. **Sensoriamento Remoto**. Agencia Espacial Brasileira (2008).

MARCUSSI, ALINE BRAGA; BUENO, CÉLIA REGINA PAES; MIQUELONI, DANIELA POPIM; ARRAES, CHRISTIANO LUNA; **UTILIZAÇÃO DE INDICES DE VEGETAÇÃO PARA OS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRAFICA**. Revista Caminhos de Geografia. v. 11 n. 35 (2010): setembro de 2010

MEROTTO JR., A., BREDEMEIER, C., VIDAL, R.A., GOULART, I.C.G.R., BORTOLI, E.D. and ANDERSON, N.L. **REFLECTANCE INDICES AS A DIAGNOSTIC TOOL FOR WEED CONTROL PERFORMED BY MULTIPURPOSE EQUIPMENT IN PRECISION AGRICULTURE**. Revista Planta daninha vol.30 no.2 Viçosa Apr./June 2012

MIMS, FORREST M. **Sun photometer with light-emitting diodes asspectrally selective detectors**. Optical Society of America. 1992.

MOLIN, JOSÉ PAULO. COLAÇO, ANDRÉ FREITAS. **Avaliação do desempenho de um sensor óptico ativo sob diferentes condições de iluminação**. Relatório Final – Bolsa de Iniciação Científica. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz-2007

MORAES, E. C; FUNDAMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO INPE-8984-PUD/62

MRÓZ, MAREK; SOBIERAJ, ANNA. **COMPARISON OF SEVERAL VEGETATION INDICES CALCULATED ON THE BASIS OF A SEASONAL SPOT XS TIME SERIES, AND THEIR SUITABILITY FOR LAND COVER AND AGRICULTURAL CROP IDENTIFICATION**. TECHNICAL SCIENCES. Techn. Sc., No 7, Y. 2004

NOVOA, LAURA MARTINEZ DE; TOMIOKA, **Jorge Estudo da Estrutura do White Light Emitting Diode – White LED**. II Simpósio de Iniciação Científica da Universidade Federal do ABC 2009

OLIVEIRA, SUSANA BRUNORO COSTA DE. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE SUPORTE A DECISAO PARA MONITORAMENTO DO USO E OCUPACAO DO SOLO UTILIZANDO DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO**. Tese (Doutorado em PRODUÇÃO VEGETAL) Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ. 2012.

ORTZ, LUANA; GUASSELLI, LAURINDO ANTONIO; CORRÊA, IRAN CARLOS STALLIVIERE. **Variação Espacial e Temporal de NDVI na Lagoa do Peixe, RS (Spatial and Temporal Variation of NDVI in the Peixe Lagoon, RS)**. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.l.], v. 4, n. 5, p. 897-908, fev. 2012. ISSN 1984-2295. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/232706>>. Acesso em: 29 ago. 2019

PEREIRA, WATERLOO FILHO; CLEMENTE, CLAUDIO FARIA BARBOSA; MÁRCIA, EVLYN LEÃO DE MORAES NOVO. **Influência das condições do**

**tempo em espectros de reflectância da água** Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 415-422.

PERES, CARLOS QUEVEDO; **CIRCUITOS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS** 2 edição editora LTC 2000

SANTOS, RONEIDE. VALLADARES, GUSTAVO SOUZA. ESPÍNDOLA, GIOVANA MIRA. **ANÁLISE DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO (NDVI) E VULNERABILIDADE AMBIENTAL DA PLANÍCIE COSTEIRA DO ESTADO DO PIAUÍ** - RCGS - Revista da Casa da Geografia de Sobral-2016

SILVA, ARIADINY MONTEIRO DA. **CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DAS FOLHAS ÚMIDAS E SECAS, DA CANA-DE-AÇÚCAR, COM ÊNFASE NOS**

SIMÕES, MAURÍCIO DOS SANTOS; ROCHA, JANSLE VIEIRA; LAPARELLI, RUBENS A. CARMAGO; **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE UMA ÁREA COMERCIAL DE CANA-DE-AÇÚCAR EM DUAS SAFRAS POR MEIO DE RADIOMETRIA DE CAMPO**. Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril 2003, INPE, p. 2367- 2374

STEFFEN, C. A. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. Instituto Nacional de pesquisas Espaciais, Divisão de Sensoriamento Remoto. Disponível em: < <https://tecnoblog.net/247956/referencia-site-abnt-artigos/> >. Acesso em: 12 de nov. de 2019. TAOS. Texas Advanced Optoelectronic Solutions Incorporated – MARCH 2009

URREGO, P. **Estimación de parámetros de calidad del agua del Lago de Maracaibo a partir de imágenes del satélite venezolano Miranda (VRSS-1)**. 2015. **Disertação**. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/publication/311953823\\_Estimacion\\_de\\_parametros\\_de\\_calidad\\_del\\_agua\\_del\\_Lago\\_de\\_Maracaibo\\_a\\_partir\\_de\\_imagenes\\_del\\_satelite\\_venezolano\\_Miranda\\_VRSS-1](https://www.researchgate.net/publication/311953823_Estimacion_de_parametros_de_calidad_del_agua_del_Lago_de_Maracaibo_a_partir_de_imagenes_del_satelite_venezolano_Miranda_VRSS-1) >. Último acesso em: 20 de agosto de 2019.

VIGANÓ, H. A.; BORGES, E. F.; FRANCA-ROCHA, W. J. S. **Análise do desempenho dos Índices de Vegetação NDVI e SAVI a partir de imagem Aster**. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. Curitiba - PR, 2011.

XUE, J.; SU, B. **Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications**. Journal of Sensors. 2017.