



GALILEO E A FORMA PARABÓLICA DA TRAJETÓRIA DOS PROJÉTEIS

JULIO CELSO RIBEIRO DE VASCONCELOS¹

RESUMO: O artigo descreve polêmicas envolvendo o estabelecimento da forma parabólica da trajetória dos projéteis, atribuído a Galileo Galilei (1564-1642). A primeira envolve o estudioso Raffaello Caverni afirmando que Galileo teria roubado a descoberta do discípulo Bonaventura Cavalieri, e, de outro lado, Emil Wohlwill e Antonio Favaro opondo-se decididamente, com Favaro acusando Caverni até de falsificação de documento. A segunda envolve Alexandre Koyré propondo que Galileo estabeleceu *a priori*, à maneira platônica, suas “leis fundamentais do movimento”, e Stillman Drake defendendo um Galileo que teria começado com experimentos anotados em manuscritos redescobertos pelo mesmo Drake em 1973. Em comum, ambos entendem a forma da trajetória dos projéteis como resultado de dedução matemática a partir daquelas “leis fundamentais”. David Hill e Ronald Naylor trarão uma inversão interpretativa, afirmando que alguns dos manuscritos redescobertos registram experimentos destinados à confirmação da trajetória parabólica, que seria, assim, a descoberta fundamental. A última polêmica envolve David Hill propondo que Galileo primeiramente viu a forma parabólica na “urina masculina” (*sic*), enquanto Jürgen Renn, Peter Damerow e Simone Rieger defendem que em 1592 o jovem pisano e o Marquês Guidobaldo del Monte a viram exatamente das formas posteriormente descritas pelo próprio Galileo em seus *Discorsi* de 1638.

PALAVRAS-CHAVE: Galileu, *Discorsi*, projéteis, trajetória, forma parabólica.

ABSTRACT: The article describes controversies involving the establishment of the parabolic shape of projectiles' trajectory, generally attributed to Galileo Galilei (1564-1642). The first one involves Raffaello Caverni stating that Galileo stole the discovery of his disciple Bonaventura Cavalieri, and, on the other side, Emil Wohlwill and Antonio Favaro decisively refusing Caverni's thesis, with Favaro accusing him of document forgery. The second controversy involves Alexandre Koyré proposing that Galileo established *a priori*, in a Platonic way, his “fundamental laws of movement”, and Stillman Drake saying that Galileo started with experiments annotated in manuscripts rediscovered by the same Drake in 1973. In common, both understand the shape of the projectiles' trajectory as a result of mathematical deduction from those “fundamental laws”. David Hill and Ronald Naylor will say that the parabolic trajectory has been the fundamental discovery and that some of the rediscovered manuscripts record experiments aimed at confirming it. The latest controversy involves David Hill proposing that Galileo first saw the parabolic shape in “male urine” (*sic*), while Jürgen Renn, Peter Damerow and Simone Rieger argue that in 1592 the young Pisan and Marquis Guidobaldo del Monte saw it exactly in the ways later described by Galileo himself in his 1638 *Discorsi*.

KEYWORDS: Galileo, *Discorsi*, projectiles, trajectory, parabolic shape.

¹ Professor de Filosofia da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS). Doutor em Filosofia pela Universidade de São Paulo (USP). E-mail: juliouefs@gmail.com.

O estabelecimento da forma parabólica da trajetória dos projéteis, um dos marcos iniciais da chamada Física Clássica, é comumente atribuído a Galileo Galilei (1564-1642). Entretanto, já houve quem recusasse a justeza dessa atribuição: trata-se de Raffaello Caverni, que no final do século XIX afirmou em seu *Storia del metodo sperimentale in Italia* que Galileo roubou a descoberta em questão de seu discípulo Bonaventura Cavalieri².

Alguns dos pontos de apoio para sua tese Caverni retira da obra publicada de Galileo. A primeira coisa nela para a qual chama a atenção é a ausência de referência à trajetória parabólica no *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* de 1632 (**Figura 1**), uma obra madura, a mais famosa de Galileo, a notável peça de defesa do sistema copernicano. Nela – embora não seja obra dedicada à matematização dos movimentos – o pisanino faz questão de anunciar as conquistas de sua mecânica, mas, estranhamente, provoca Caverni, nada diz sobre a forma parabólica das trajetórias balísticas.

No *Dialogo*, prossegue Caverni, há uma passagem conhecida como *bizzarria*, em que Galileo, ao discutir como seria a trajetória de uma pedra cadente vista de fora da Terra em rotação, afirma que esta é circular. Aqui está, proclama Caverni, como Galileo vê em 1632 a trajetória dos projéteis: como um arco de circunferência e não como uma linha parabólica.

A seguir, Caverni traz à baila um dramático episódio. Meses após a publicação do *Dialogo*, Cavalieri publicou em seu *Lo Specchio ustorio overo Trattato delle settioni coniche* a prova da forma parabólica das trajetórias balísticas, com outras considerações mecânicas, que reconhece serem “em parte” dos mestres Galileo e Benedetto Castelli. Logo a seguir, Galileo escreve ao amigo comum Cesare Marsigli uma carta magoada, reclamando que Cavalieri lhe estava retirando os “primeiros frutos” de seus estudos mecânicos, estudos que confiantemente “compartilhou” com o discípulo.

Cavalieri escreve, então, a Marsigli, falando do desgosto que sentiu ao se dar conta de que ofendeu o mestre e dando crédito a Galileo. A carta constitui uma reviravolta, pois no *Specchio* Cavalieri sugeriu fortemente que era dele a descoberta e agora diz que “é amplamente sabido” que ela se deve a Galileo e ao Marquês Guidobaldo del Monte, que teriam se dado conta da forma parabólica em experimentos no final do século XVI.

Na carta a Marsigli, Cavalieri vai mais além e se oferece para corrigir ou mesmo queimar toda a edição do *Specchi*. Para Caverni, esse desesperado rompante de Cavalieri atesta que

² Não me foi possível acesso ao original de Caverni. Mas felizmente há tradução para o inglês, do trecho do *Storia* que aqui interessa, no *GALILEO IN CONTEXT* (RENN 2001 pp. 341-355), bem como um artigo, de G. CASTAGNETTI e M. CAMEROTA, que o apresenta e comenta (RENN 2001 pp.327-339). No mesmo livro também estão as outras obras que constituem a polêmica que a seguir se descreve; nas notas seguintes daremos suas localizações no *GALILEO IN CONTEXT*.

Galileo seria um “tirano passional” que se apropria do trabalho do discípulo e ainda o oprime com a terrível ameaça de ficar com a pecha de traidor e ladrão do mestre.

É claro que uma tese tão forte como a de Caverni, mesmo apresentada de modo tão plausível e erudito, não ia ficar sem resposta veemente: ela foi decididamente recusada, ainda no final do século XIX, mais exatamente em 1899, pelo alemão Emil Wohlwill, com uma miríade de contra-argumentações, algumas oferecidas a partir de manuscritos galileanos destacados pelo estudioso italiano Antonio Favaro, o responsável pela publicação das *Opere* de Galileo. Wohlwill, porém, deixou irresolvida a questão de como exatamente Galileo teria chegado à trajetória parabólica, embora seja um dos primeiros a propor que a descoberta teria ocorrido nos anos de juventude e teria antecedido as demais conquistas da ciência galileana de movimento³.

Não foi de Wohlwill, porém, que a argumentação de Caverni sofreu o maior contra-ataque: Favaro, em artigo publicado em 1917, ampliado e republicado em 1919-1920, praticamente provou que – em seu esforço de, por assim dizer, redimensionar a estatura de Galileo – Caverni falsificou deliberadamente um documento⁴.

A história é a seguinte: a argumentação de Caverni também se apoiava sobre um manuscrito que ele dizia ter redescoberto e atribuía a Galileo, mais exatamente a Vincenzo Viviani, discípulo e primeiro biógrafo de Galileo que teria re-escrito o manuscrito, “lembrando-se das palavras do mestre que ouvira em seu refúgio de Arcetri”. O manuscrito está na forma de diálogo, e nele se lê que a forma parabólica teria sido visualizada em correntes de metal suspensas por suas extremidades. De fato, se uma corrente é assim suspensa sem ser esticada, a forma que adquire é curva e bastante semelhante a uma parábola (só estudiosos posteriores a Galileo mostrarão que ela, conhecida como “catenária”, tem forma diferente da parabólica).

Mas Favaro, com o monumental conhecimento que tinha sobre a obra de Galileo e a de seus correspondentes e discípulos, usou as próprias análises de Caverni sobre o manuscrito para contestar sua autenticidade de modo dificilmente retorquível⁵.

A força da contestação de Favaro e o fato de que Caverni havia morrido em 1900 selaram definitivamente a sorte da tese da apropriação indébita por Galileo da suposta

³ O trabalho de Wohlwill também está no *GALILEO IN CONTEXT* (RENN 2001 pp. 376-410), bem como artigo, de HANS-WERNER SCHUTT, que o apresenta e comenta (RENN 2001 pp.371-3).

⁴ A denúncia de Favaro também está no *GALILEO IN CONTEXT* (RENN 2001, pp. 363-9), antecedida por artigo de G. CASTAGNETTI e M. CAMEROTA (RENN 2001, pp. 357-361).

⁵ Jürgen Renn informa (RENN 2001 p. 324) que uma análise recente usando a técnica PIXE (Particle Induced X-ray Emission), realizada no *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare* em Florença, dá apoio às denúncias de Favaro contra Caverni.

descoberta de Cavalieri. Assim, a tese de Caverni acabou sendo esquecida, junto com a própria polêmica que Wohlwill e Favaro impulsionaram.

Depois de décadas de ausência de formulações interpretativas sobre o estabelecimento da forma parabólica da trajetória dos projéteis, uma outra tese se tornará muito influente, a do francês de origem russa Alexandre Koyré, segundo a qual Galileo estabeleceu *a priori* suas “leis fundamentais do movimento” (de queda dos corpos), trazendo à luz “como Platão outrora nos ensinou” regularidades tais como a proporcionalidade direta entre a velocidade (instantânea) e o tempo (a definição do que Galileo intitula “movimento naturalmente acelerado”) e como a dependência do espaço (total percorrido) para o quadrado dos tempos, a chamada “lei matemática da queda dos corpos” (KOYRÉ 1982 p. 193-4).

De acordo com essa interpretação, a forma das trajetórias balísticas é uma consequência matemática dessas leis, o que, aliás, está totalmente de acordo com a sistematização da teoria do movimento que Galileo publicou em seus *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a due nuove scienze* de 1638 (**Figura 2**). Sendo a forma da trajetória dos projéteis, nos *Discorsi*, apresentada como resultado de dedução matemática a partir das “leis fundamentais do movimento” – resultado obtido através de recursos às Geometrias de Euclides e de Apolônio, soberanas e incontestes na primeira metade do século XVII – e sendo amplamente impactantes a erudição e a força das argumentações de Koyré, o ponto de vista deste *savant* se evidencia como mais do que plausível e perdem importância a datação e o detalhamento do processo pelo qual teria se dado o estabelecimento da forma parabólica.

Datas e etapas do desenvolvimento da mecânica galileiana voltam a ser importantes, porém, em 1973, quando Stillman Drake redescobre manuscritos de Galileo preservados na Biblioteca Nacional Central de Florença, no volume 72 dos arquivos referentes às obras galileanas, manuscritos que não constavam da monumental compilação feita por Favaro, nos albores do século XX, das *Opere* de Galileo. Embora tenha publicado tais manuscritos e para eles proposto interpretações como refutações de muitas das argumentações de Koyré para defender sua tese de um “platonismo” de Galileo, Drake jamais deixou de encarar a forma parabólica da trajetória como secundária na chamada ordem das descobertas. Ou seja: como Koyré, crê que a lei da queda é estabelecida primeiramente, mais exatamente, propõe, em 1604. E, com base em dois dos manuscritos redescobertos, os fólhos 114v2⁶ (**Figura 3**) e 116v (**Figura**

⁶ Drake em seu *Galileo's Notes on Motion* “recortou” o folio 114v em três partes: destacou na pag. 92 deste livro a segunda parte (114v2), com os desenhos de parábolas e os números a elas associados (que ele interpreta como anotações de lançamentos experimentais e seus observados alcances horizontais), apresentando as duas outras partes (114v1 e 114v3), contendo apenas cálculos, na pag. 94.

4), Drake propõe que Galileo em 1608 teria confirmado experimentalmente a conservação do movimento horizontal. Com esses experimentos, Galileo teria sido “imediatamente” levado à trajetória parabólica dos projéteis (DRAKE, 1973, p. 303), já que as muitas repetições experimentais, anotadas nos fólhos 114v2 e 116v, lhe teriam propiciado a constatação empírica da forma parabólica da trajetória dos projéteis.

O ponto de vista de Drake sobre a descoberta da trajetória balística não foi, claro, formalmente contestado por James MacLahlan, quando este trabalhou com Drake em análises e reconstruções de experimentos (DRAKE & MACLAHLAN, 1975, p.102&110). Porém, dois dos outros estudiosos que se atiraram sobre os manuscritos redescobertos, David Hill e Ronald Naylor, recusaram que a forma parabólica tenha sido estabelecida apenas pela observação e entendem que um manuscrito que Drake negligenciara, o fólho 81r (**Figura 5**), registra uma série de engenhosos experimentos destinados a confirmar a forma parabólica. Além disso, invertendo as perspectivas de Koyré e Drake, Naylor e Hill crêem que a descoberta da trajetória parabólica antecedeu o estabelecimento da lei da queda dos corpos e que, após a confirmação da forma da trajetória dada pelo fólho 81r, Galileo teria planejado os experimentos dos fólhos 114v2 e 116v, nesta ordem, para verificar a lei de queda dos corpos e sua teoria dos projéteis a ela associada (HILL 1988, p. 661; NAYLOR 1976, pp. 405-406).

Quanto à primeira visualização da forma parabólica, David Hill crê que esta teria se dado fora de cenário experimental: depois de considerar uma sugestão que MacLahlan lhe dá em conversa pessoal, a de que Galileo teria inicialmente observado a forma parabólica em fluxos de água como os de fontes e drenos, Hill arrisca a hipótese de que o conhecimento de tal forma teria surgido da observação de “urina masculina” (*sic*) (HILL 1998 p. 667)⁷.

Uma outra possibilidade - muito mais elegante - é sugerida pelo próprio Galileo, em seus *Discorsi* de 1638, quando assim informa ao leitor como desenha linhas parabólicas:

...Tomo uma bola de bronze, perfeitamente redonda, não maior que uma noz; esta, lançada sobre um espelho de metal, colocado não perpendicularmente ao horizonte mas um pouco inclinado ... deixa uma linha parabólica muito nítida e precisa, mais larga ou mais estreita segundo o ângulo de projeção seja mais ou menos elevado (GALILEI 1988, p. 144).

Imediatamente a seguir nos *Discorsi* Galileo propõe aquela outra maneira de desenhar parábolas, que, como já sabemos, a posteridade denunciará constituir um notável erro:

⁷ Para quem se interessa por conhecer detalhes da enorme sequência de *papers* dedicados a análises dos manuscritos redescobertos, sinto-me à vontade para recomendar me artigo de 2005, onde descrevo detalhadamente as hipóteses interpretativas, as reconstruções de experimentos etc.

suspender entre dois pregos uma “corrente muito fina e comprida” e marcar sobre a parede “o percurso que ela faz” (GALILEI 1988, p. 144).

Decididos a respeitar essas declarações de Galileo, Jürgen Renn, Peter Damerow e Simone Rieger tomam a cena, engrossando o coro dos que entendem que a forma parabólica da trajetória dos projéteis foi a pioneira descoberta (embora problematizem essa palavra, dada a complexidade do processo que crêem ter ocorrido). Tomando indicações dos manuscritos redescobertos, bem como dos textos daquela polêmica, que há pouco descrevíamos, entre as interpretações de Favaro e Wohlwill, de um lado, e Caverni, de outro, Renn, Damerow e Rieger argumentam que a forma parabólica se mostrou logo em 1592, quando o jovem Galileo trabalhava com seu protetor, o Marquês Guidobaldo del Monte. E ela teria se revelado exatamente das formas descritas mais acima, através de correntes suspensas entre dois pregos e através da rolagem de uma bola por um espelho metálico inclinado (RENN, DAMEROW & RIEGER 2000, p. 300).

Em resumo, Renn, Damerow e Rieger, em consonância com Naylor e Hill, retomando a indicação que Wohlwill dera no início do século passado, ensinam-nos que embora as propriedades dos projéteis sejam, na ciência do movimento apresentada nos *Discorsi*, subordinadas à teoria do “movimento naturalmente acelerado”, no contexto de descoberta elas vêm primeiro. Se esses estudiosos estiverem corretos, então se pode dizer que a descoberta e a confirmação da forma da trajetória dos projéteis foram as grandes impulsionadoras da saída de Galileo daquilo que Isabelle Stengers chama de “labirinto conceitual” (STENGENS 1989 p.34): de posse desse dado seguro, Galileo pode superar as dificuldades de sua herança medieval - como por exemplo a falta de um conceito de velocidade instantânea - rejeitar a crença inicial na proporcionalidade da velocidade à distância de queda (expressa numa famosa carta ao Frei Paolo Sarpi de 1604 (GALILEI 1933 Vol.10, p. 115-6)) e estabelecer, por fim, a lei correta da queda dos corpos (que, como já anotado, tem como premissa a proporção entre velocidade e tempo).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DRAKE, Stillman. "Galileo's Experimental Confirmation of Horizontal Inertia: Unpublished Manuscripts". In: *Isis*, 1973, 64:291-305.

_____. “Galileo’s Discovery of the Parabolic Trajectory”. In: *Scientific American*, march 1975, pp. 102-10.

_____. *Galileo's Notes on Motion*. Firenze: Istituto e Museo di Storia della Scienza, 1979.

- _____. *Galileo: Pioneer Scientist*. Toronto: University of Toronto Press, 1990.
- DRAKE & MACLAHLAN. "Galileo's Discovery of the Parabolic Trajectory". In: *Sc. American*, mar 1975, 232:102-110.
- _____. "Reply to the Shea-Wolf Critique". In: *Isis*, 1975, 66:400-403.
- GALILEI, Galileo. *Opere*. Firenze: G. Barbera, 1933.
- _____. *Duas Novas Ciências*. São Paulo: Nova Stella, 1988.
- _____. *Two New Sciences*. Toronto: Wall & Thompson, 1989.
- HILL, David. "A Note on a Galilean Worksheet". In: *Isis*, 1979, 70:269-271.
- _____. "Dissecting Trajectories; Galileo's early Experiments on Projectile Motion and the Law of Fall". In: *Isis*, 1988, 79:646-668.
- KOYRÉ, Alexandre. "A Documentary History of the Problem of Fall from Kepler to Newton". In: *Trans. Am. Phil. Soc.* 45 (1955).
- _____. *Estudos de História do Pensamento Científico*. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 1982.
- _____. *Estudios Galileanos*. Ciudad de México: Siglo Veintiuno, 1988.
- NAYLOR, Ronald. "An aspect of Galileo's study of the parabolic trajectory". In: *Isis*, 1975, 66:394-396.
- _____. "Galileo: Real Experiment And Didactic Demonstration". In: *Isis*, 1976, 67:398-419.
- RENN, Jürgen (ed.). *Galileo in context*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- RENN, Jürgen, DAMEROW, Peter, RIEGER, Simone. "Hunting the White Elephant: When and How did Galileo Discover the Law of Fall?". In: *Science in Context* 13, 3-4 (2000), pp. 299-419. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- SETTLE, Thomas. "An Experiment in the History of Science". In: *Science*, 1961, 133:19-23.
- _____. "Galileo's use of experiments as a tool of investigation". In: Mc Mullin (Ed.), *Galileo, Man of Science*. Princeton: The Scholars Bookshelf, 1988.
- SHEA & WOLF. "Stillman Drake and the Arquimedian Grandfather of Experimental Science". In: *Isis*, 1975, 66:397-400.
- SETTLE, Thomas. "An Experiment in the History of Science". In: *Science*, 1961, 133:19-23.
- _____. Mc Mullin (Ed.), "Galileo's use of experiments as a tool of investigation". In: *Galileo, Man of Science*, The Scholars Bookshelf, Princeton, 1988.
- STENGERS, Isabelle. *Quem tem medo da Ciência (Ciência e Poderes)*. S. Paulo: Siciliano, 1989.
- VASCONCELOS, Júlio C.R. *Uma Análise da teoria dos projéteis dos Discorsi de Galileo* (dissertação de mestrado). São Paulo: FFLCH-USP, 1992.

_____. "Os manuscritos redescobertos em 1973 e o programa experimental de Galileo Galilei". In: Barra, Calazans & Calazans (org.). *Anais do III Encontro da Rede Paranaense de História e Filosofia da Ciência*. Curitiba: UFPR, 2005, pp. 102-119.

_____. "Características estruturais da teoria dos projéteis de Galileo Galilei" In: Chibeni, S. S. et al. (org.) *Filosofía e historia de la ciencia en el Cono Sur : selección de trabajos del X Encuentro de la Asociación de Filosofía e Historia de la Ciencia del Cono Sur*. Córdoba: AFHIC, 2018, pp. 397-408.

IMAGENS:

FIGURA 1:

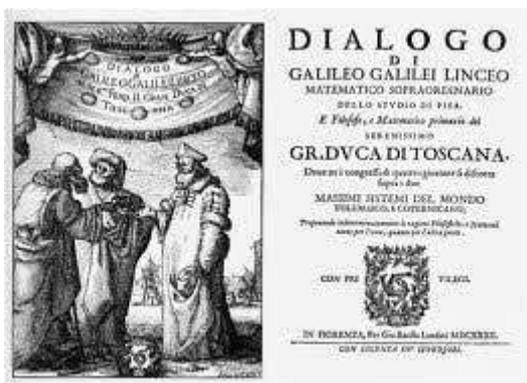


FIGURA 2:



FIGURA 3:

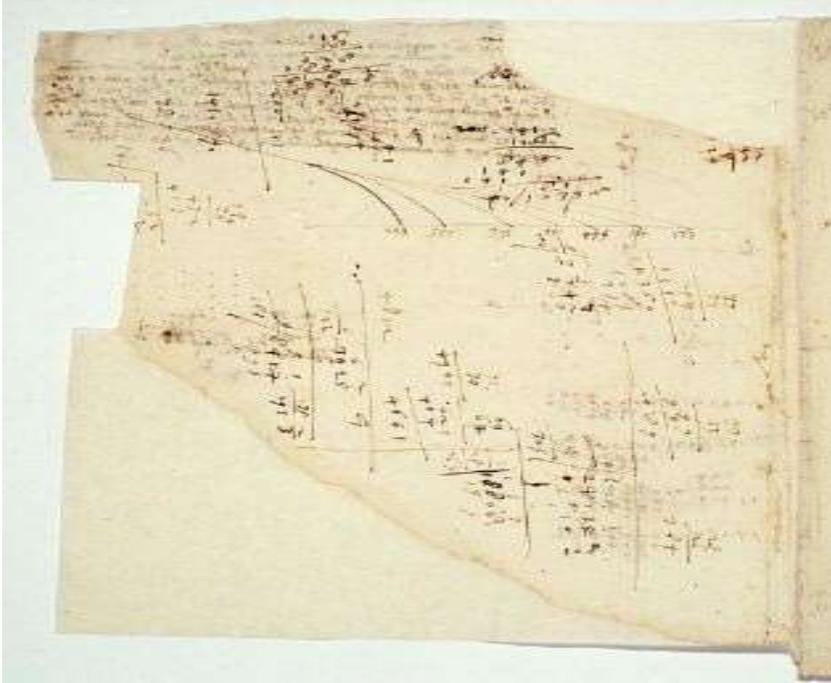


FIGURA 4:

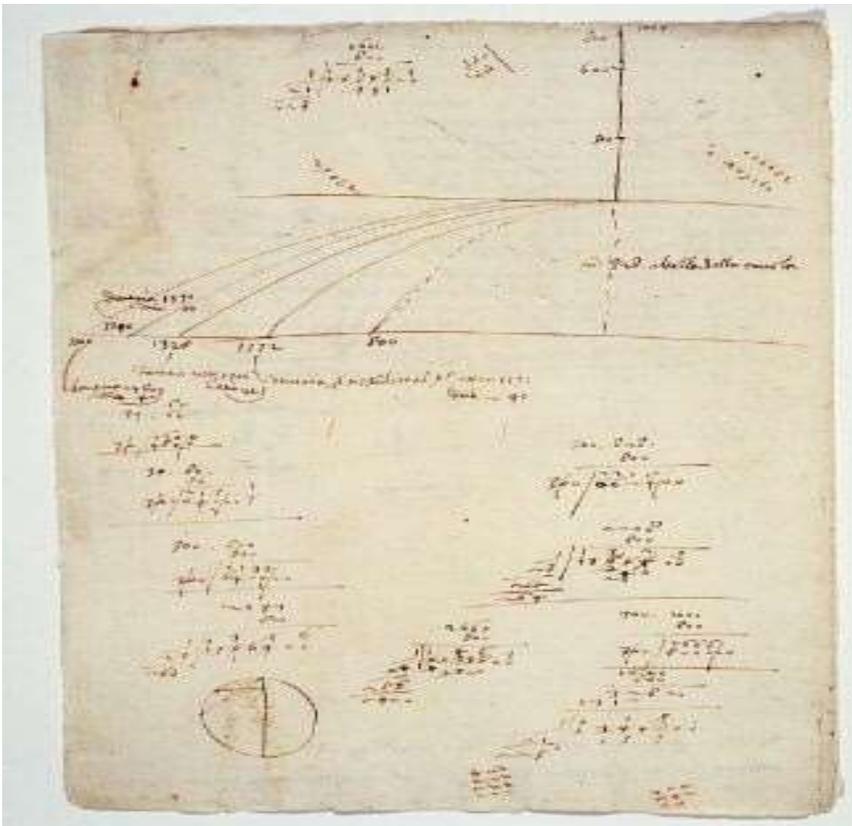


FIGURA 5:

